

**Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**



## **Návrh konstrukce systému řízení a pohonu lunet pro vyrovnání pružné deformace klikového hřídele při ustavení a obrábění**

Design of control system and power leveling Rest for the elastic deformation of the  
crankshaft in the establishment of a working

**Ing. Stanislav Dubina**

**Vědecké spisy Fakulty strojní**

**Edice: Autoreferáty disertačních prací,sv.254**

**2014**

**Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra výrobních strojů a konstruování**

**Návrh konstrukce systému řízení a pohonu lunet pro  
vyrovnání pružné deformace klikového hřídele při  
ustavení a obrábění**

Design of control system and power leveling Rest for the elastic deformation of the  
crankshaft in the establishment of a working

**Autoreferát disertační práce**

Školící pracoviště:

VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

Školitel:

doc.Ing.Jiří Fries, Ph.D.

Studijní program:

P23 01 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2302V019

Doktorand:

Ing.Stanislav Dubina

**Ostrava 2014**

## ANOTACE

Předkládaná disertační práce na téma „Návrh konstrukce systému řízení a pohonu lunet pro vyrovnání pružné deformace klikového hřídele při ustavení a obrábění“ zpracovává daný problém na úrovni teoretické i praktické. Výsledky této práce byly podkladem k realizaci uvedené technologie ve firmě Vítkovice HEAVY MACHINERY a.s.

V úvodní části je popsána analýza stávající technologie výroby finálního výrobku, jeho specifikace, dosažení ekonomických přínosů i způsobu realizace. Další část práce je věnována tvorbě geometrického a matematického modelu klikového hřídele, ustavovacích algoritmů, počítačového simulátoru, které jsou následně podkladem k návrhu konstrukce lunety, návrh systému bezdrátového měření dýchání klikové hřídele, návrhu řídicího systému řízení lunet, pohonů. Tento způsob mj. eliminuje případné nezmary v době realizace, resp. minimalizuje náklady spojené s opravami a úpravami zařízení během oživení a zkoušek. Závěrečná část práce je věnována testování, ověření funkčnosti prototypu řídicího systému řízení lunet a srovnávacímu měření-laboratornímu s reálnou skutečností.

## ANNOTATION

This PhD thesis on „Design of control system and drive of rests for equilibration of the elastic deformation of crankshaft during the establishment process and machining“ elaborate mentioned topic on theoretical and also practical level. Results of this work has been a base for realization mentioned technologies in VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY, a.s.

In the first part, there is described the analysis of existing technology of manufacturing of final product, its specifications, economic benefits and methods of implementation. The next part is engaged to creation of geometric and mathematical model of crank shaft, fitting algorithms, computer simulator that are subsequently the basis for rests design, design of wireless system for measurement of deflection of crank shaft, design of control system for rests and drives. This method eliminates, among others, possible failures during the realisation respectively minimizes costs related to repairs and modification during the recovery and testing. The final part describes testing, verifying the functionality of prototype control system of the rests and comparative laboratory testing with real facts.

<b>1. Úvod</b>	<b>4</b>
<b>2. Technologie obrábění - analýza dané problematiky</b>	<b>5</b>
2.1 Rozměrové parametry obráběných zalomených hřídelí	5
2.2 Stávající technologický postup ustavení a obrábění hřídelí	6
2.3 Měření dýchání	7
2.4 Časová náročnost opracování zalomené hřídele	8
2.5 Konstrukce stávajících lunet	9
<b>3. Stanovení cílů</b>	<b>11</b>
3.1 Přínosy pro uživatele	11
3.2 Novost navrhovaného řešení	12
3.3 Popis jednotlivých etap návrhu	13
<b>4. Návrh nové koncepce řešení - teoretická část</b>	<b>14</b>
4.1 Matematický popis klikového hřídele	14
4.2 Geometrický model	14
4.3 FEM model	15
4.4 Kondenzovaný model	15
4.5 Kvazistatické řešení	17
4.6 Tvorba algoritmu optimálního ustavení	17
4.7 Ověření algoritmu optimálního ustavení	19
<b>5. Návrh nové koncepce řešení řídicího systému - teoretická část</b>	<b>21</b>
5.1 Řídicí systém pro vyrovnávání pružné deformace zalomených hřídelí při obrábění - část oscilační luneta	21
5.2 Řídicí systém pro vyrovnávání pružné deformace zalomených hřídelí při obrábění - část obráběcí stroj	28
<b>6. Návrh konstrukce lunety-teoretická část</b>	<b>29</b>
6.1 Konstrukční řešení	29
6.2 Výpočet působení sil na lunety	30
6.3 Návrh prvků hydraulického obvodu	33
6.3.1 Návrh hydromotoru, hydraulického agregátu a válce	34
6.3.2 Návrh hydraulického akumulátoru lunety	35
6.4 Analýza napětí lunet	36
<b>7. Vývoj prototypu lunety - praktická, dílenská část</b>	<b>42</b>
7.1 Vývoj prototypu řídicího systému	42
7.2 Testování, návrh změn řídicího systému	42
7.3 Testování komunikace proměnné pro komunikaci mezi systémem REX a Simatic pro řízení lunet	49
7.4 Testování, ověření funkčnosti prototypu řídicího systému řízení lunet	50
<b>8. Patenty a užité vzory</b>	<b>54</b>
<b>9. Závěr</b>	<b>55</b>
9.1 Přínosy pro uživatele	55
9.2 Ekonomické parametry řešení	56
9.3 Aktuální situace	57
<b>10. Seznam použité literatury</b>	<b>62</b>
<b>11. Přílohy</b>	<b>64</b>

## 1 Úvod

Práce vychází ze specifických problémů charakteristických pro třískové opracování klikových hřídelí pro pístové motory používané především pro lodní průmysl. Problém s vyvažováním klikových hřídelí je společný pro všechny výrobce zalomených klikových hřídelí - bereme-li v úvahu parametry klikových hřídelí jako obrobků (délka a hmotnost), je to identický a akutní problém všech výrobců na trhu.

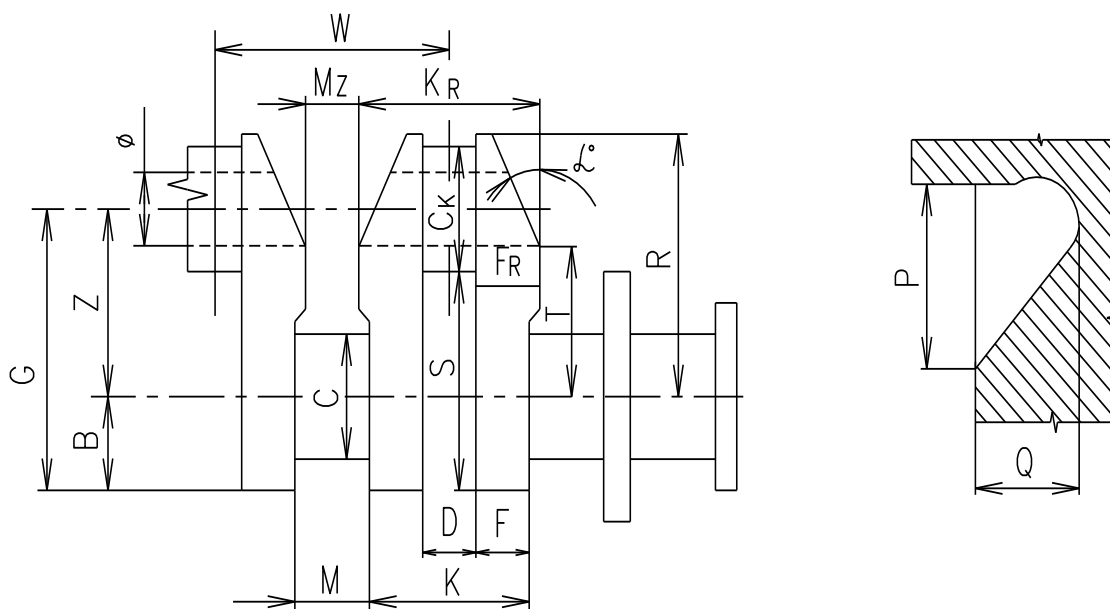
Základním problémem jsou nepřesnosti projevující se při opracování klikových hřídelí při tzv. dýchání. Dýchání hřídelí při otáčivém pohybu během opracování je způsobeno pružností hřídelí jejich hmotností a dále tím, že osa otáčení nesouhlasí přesně s osou hřídelí. Hodnoty dýchání příslušné k jednotlivým ojnicím se obecně mění v závislosti na úhlu natočení hřídele. Je-li však hřídel řádně vyvážen, potom při jejím otáčení nedochází k nechtěnému dýchání mezi libovolnými sousedními rameny hřídele (vzdálenost mezi rameny je trvale konstantní). Tohoto stavu se snaží obsluha obráběcích strojů dosáhnout v současnosti pouze vhodným ustavením na lunetách.

Ve skutečnosti je věc ještě mnohem složitější, protože cílem celého procesu není jednorázové vyvážení hřídele, ale výroba hřídele, který splňuje přísné podmínky na přesnost v setinách mm. V důsledku toho je nutné proces vyvažování opakovat **ručním nastavováním** podpěrných sil oscilačních lunet. Vzhledem k velkým rozměrům hřídelí (až 14 000mm, až 125 tun) a současnému způsobu měření dýchání přímoukazujícími mikrometry bez elektrického výstupu je vyvažování velmi komplikované a potřebný čas je úměrný zkušenostem a schopnostem obsluhy obráběcích center, obráběním každého klikového čepu a často je nutné upravovat i v průběhu obrábění.

## 2. Technologie obrábění - analýza dané problematiky

### 2.1 Rozměrové parametry obráběných zalomených hřídelí

Pro volbu vhodné výrobní technologie je potřebné znát některé důležité údaje, jakými u klikových hřídelí jsou např. pro soustruhy: točný průměr nad suportem, točná délka, nosnost a případně další.



Obrázek 2.1 - Základní rozměrové parametry vybraných klikových hřídelí [13]

Níže jsou uvedeny základní parametry vyráběných hřídelí ve středisku VM. Na jednotlivé parametry - rozměry se pak váže konkrétní technologie, kterou je dosažení parametrů nejekonomičtější (obr. 2.1, tab. 2.1).

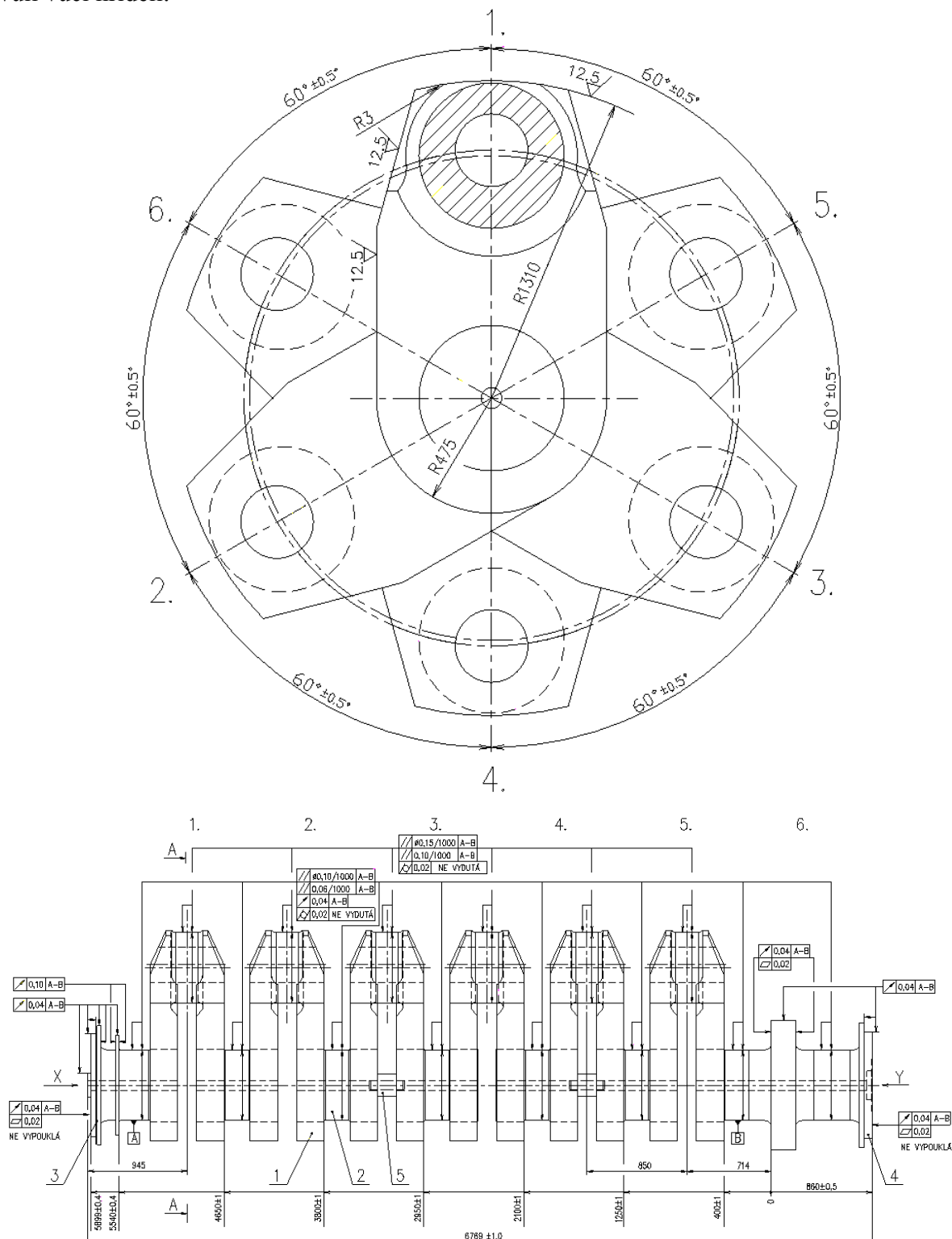
Tabulka 2.1 - Konkrétní rozměry jednotlivých parametrů vybraných hřídelí [13]

TYP hř.	B	C/Ck	D	F	FR	G	K/KR	Q	R	S	T	□°	W	Z	Ø	VÁHA
		314														683
S 26 MC	270	320	110	130	130	760	370	32,5	655	600	425,7	22,5	490	490	160	635
S 35 MC	318	390	142	147	156	1018	454	28	900	823	617,5	22,5	600	700	195	1232
																1323
S 42 MC	365	500	154	197	210	1247	574	43,5	1137	997	772,5	22,5	748	882	250	2317
S 42 MC		472														
(Japonsko)	365	500	154	203	203	1247	561	43,5	1137	997	788,2	22,5	748	882		2480
S 46MC-C	462	560	152	213	213	1428	578	48	1255	1148	989,1	25	782	966	280	
S 46MC-C	430	560	152	213	213	1396	578	49	1255	1116	895,3	22,5	782	966		3345
S 46MC-C	455	560	152	213	213	1421	578	49	1255	1141	989,1	25	782	966		3727

## 2.2 Stávající technologický postup ustavení a obrábění hřídelí

Veškeré práce byly ověřovány na experimentální hřídeli uvedené na obrázku 2.2

Při manipulaci s hřídely v prostoru haly je hřídél zavěšen na dvou manipulačních čepech mezi čely 3. a 5. zdvihu (1. zdvih je zdvih nejbližší vřeteníku). Tyto čepy se při obrábění centrálních čepů nevysouvají neb nemají vliv na axiální, radiální ani tangenciální pohyby hřídela vlivem vůlí vůči hřídeli.



Obr. 2.2- Experimentální hřidel

## 2.3 Měření dýchání

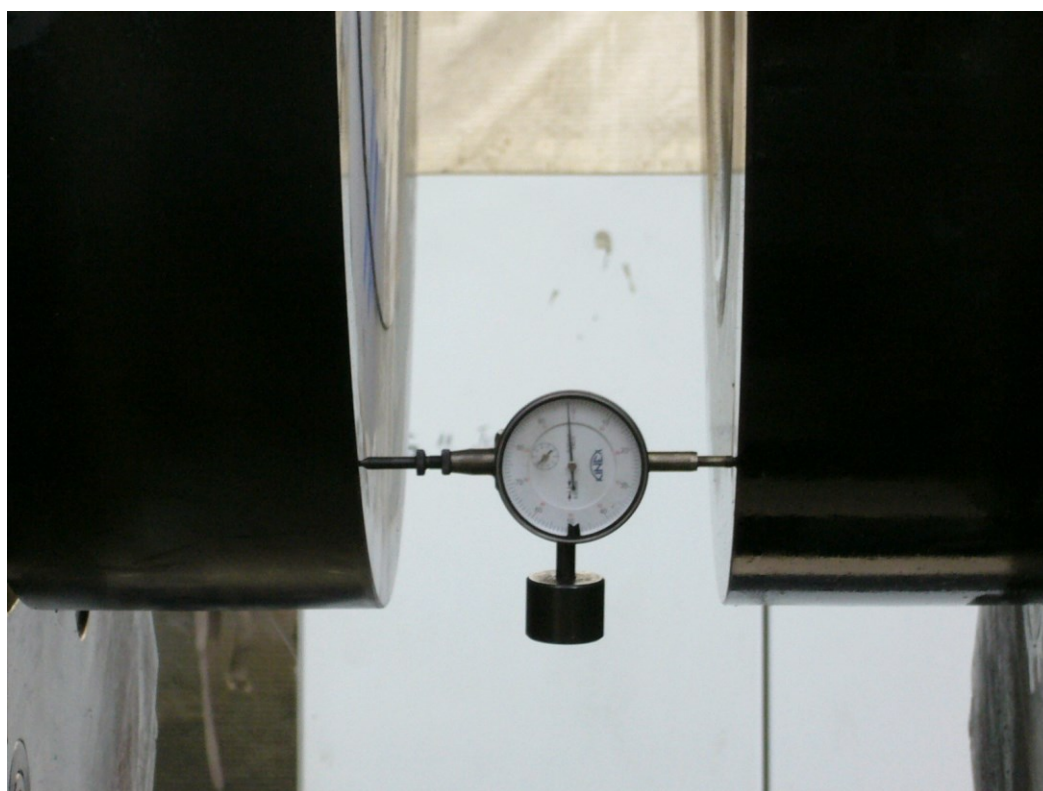
### Měření dýchání při stejných podmínkách

**Tabulka 2.4** - skutečně naměřených velikost tlaku v lunetách [19]

č. lunety	1	2	3	4	5	6	7
tlak	36 Bar	36 Bar	36 Bar	35,5Bar	36,0 Bar	24 Bar	0 Bar

Poznámky k měření:

- u druhé lunety tlak nebyl vypuštěn, ale luneta byla fixována bočními pistony pravděpodobně výškově přibližně ve stejné poloze jako by byla při pouhém tlaku, ale osa by měla být centrovaná pomocí bočních pístů
- u sedmé lunety byly ve funkci pouze oba boční pistony, tak aby byla fixovaná osa hřídele
- měřené dýchání bylo provedeno od první kliky k šesté při 3,5ot/min.



Obr. 2.3-Umístění klasických měřicích hodinek

### Měření dýchání prvního zdvihu kliky při vyvážení

**Tabulka 2.5** - změřených naměřených velikost tlaku v lunetách [19]

č. lunety	1	2	3	4	5	6	7
tlak	54 Bar	36 Bar	36 Bar	35,5 Bar	36,0 Bar	24 Bar	0 Bar



## Poznámky k měření:

- u druhé lunety tlak nebyl snížen, ale luneta byla fixována bočními pistony pravděpodobně výškově přibližně ve stejné poloze jako by byla při pouhém tlaku, ale osa byla centrovaná pomocí bočních pístů
- u sedmé lunety byly ve funkci pouze oba boční pistony, aby byla fixovaná osa hřídele
- v dalším kroku je snížen tlak v 2. lunetě (což by se nemělo projevit, protože hřídel by měl sedět na bočních pístech a ne na spodním oscilačním pístu)
- upravování bočních pístů lunety (mělo by se projevit)
- u první lunety (2. centrální čep) dojde ke stahování.

**Tabulka 2.6** - změněných naměřených velikost tlaku v lunetách [19]

č. lunety	1	2	3	4	5	6	7
tlak	48,0Bar	0 Bar	44 Bar	33 Bar	32 Bar	28 Bar	0 Bar

## Poznámky k měření:

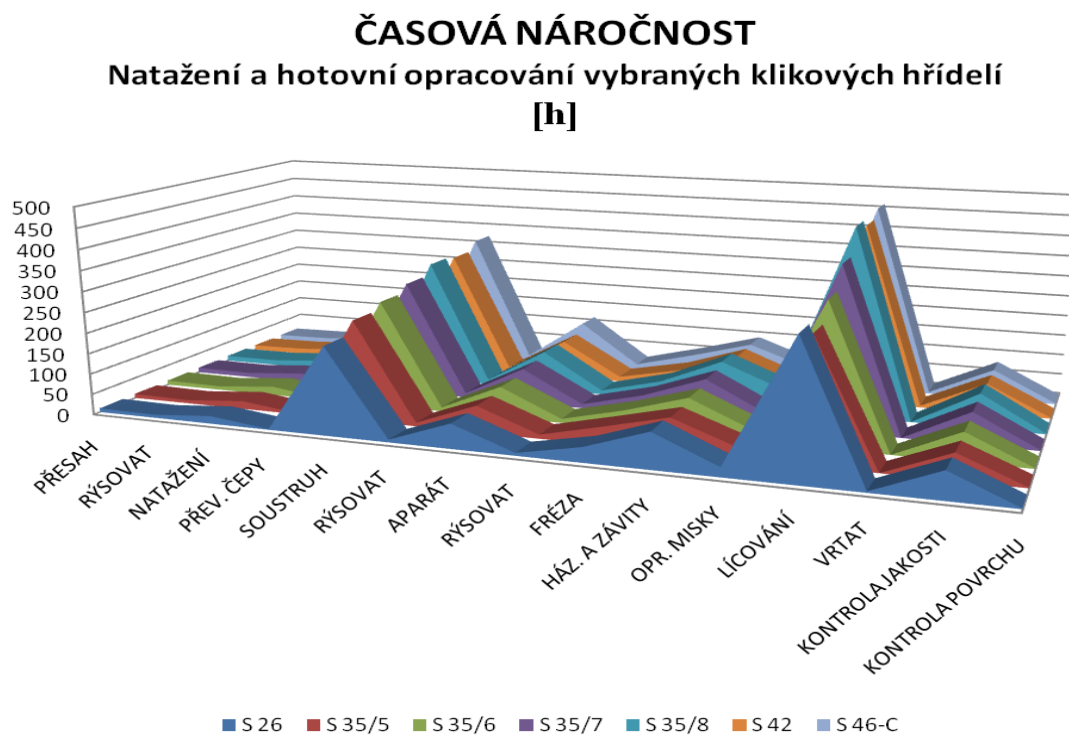
- u první lunety je ještě před stahováním snížen tlak, aby byl čep volný – měření je uskutečněno s tlakem 0
- druhé lunety byly ve funkci pouze oba boční pistony, aby byla fixovaná osa hřídele
- u sedmé lunety byly ve funkci pouze oba boční pistony, aby byla fixovaná osa hřídele
- měření bylo prováděno při otáčkách 1,5ot/min.

**2.4 Časová náročnost opracování zalomené hřídele**

V níže uvedených grafech a tabulce (obr. 2.4.1 a 2.4.2, tab. 2.4) jsou vyčísleny a znázorněny časové nároky jednotlivých úkonů, jenž jsou nutné k opracování vybraných typů sestav klikových hřídelí. Největší zátěže jsou, jak je patrné, alokovány na soustružení a na lícování.

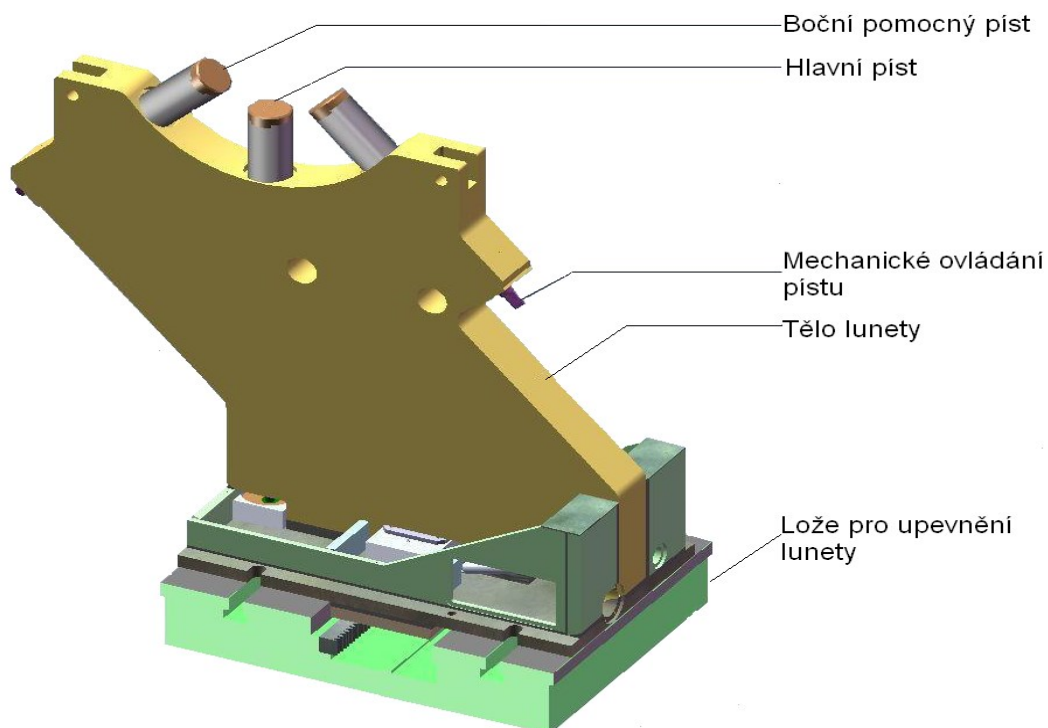
**Tabulka 2.7** - typy hřídelí [28]

<b>SESTAVA typu S 26, 35, 42 MC, S 46 MC-C</b>								
Natažení a hotovní opracování								
<b>OPERACE</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>Tar.</b>
<b>TYP SESTAVY</b>	<b>S 26</b>	<b>S 35/5</b>	<b>S 35/6</b>	<b>S 35/7</b>	<b>S 35/8</b>	<b>S 42</b>	<b>S 46-C</b>	<b>St.</b>
PŘESAHA	9,35	10,20	11,05	11,90	12,75	11,90	11,90	6
RÝSOVAT	7,65	8,00	9,00	11,00	13,00	14,00	14,00	7
NATAŽENÍ	18,70	19,55	21,25	22,10	23,80	24,65	27,20	8
PŘEV. ČEPY	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	6
SOUSTRUH	212,50	242,25	259,25	277,95	303,45	297,50	320,00	8
RÝSOVAT	6,80	9,00	10,00	11,00	12,00	12,00	13,00	7
APARÁT	59,50	64,60	74,80	85,85	96,90	93,50	113,05	8
RÝSOVAT	6,80	10,00	10,00	10,00	10,00	12,00	13,00	7
FRÉZA	35,70	44,20	45,05	45,90	46,75	41,65	50,15	8
HÁZ. A ZÁVITY	85,85	79,90	89,25	99,45	109,65	90,10	90,95	8
OPR. MISKY	22,95	26,35	26,35	26,35	52,70	33,15	40,80	8
LÍCOVÁNÍ	323,00	293,25	339,15	393,55	456,45	439,45	459,85	8
VRTAT	3,40					4,25	4,25	5
KONTROLA JAKOSTI	65,45	62,05	68,85	76,50	84,15	73,10	73,95	7
KONTROLA POVRCHU	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	5
CELKEM NH	<b>861</b>	<b>872</b>	<b>967</b>	<b>1074</b>	<b>1225</b>	<b>1150</b>	<b>1235</b>	



Obr. 2.4.1 Časová náročnost obrábění [28]

## 2.5 Konstrukce stávajících lunet



obr. 2.5.1 – Nákres modelu mechanicky ovládané lunety

### Mechanická luneta

Celkový model vychází z tvaru lunety mechanické, a proto by měly zůstat zachovány některé konstrukční parametry, jako například plocha pístu, celková velikost lunety, její tvar a jiné (viz obr.2.5.1).

Materiál lunety je z tlustého ocelového plechu opracován do požadovaného tvaru. V lunetě budou tři písty, jeden hlavní a dva boční pomocné. Posuv po loži řešen mechanickou převodovkou.

### Hydraulická luneta

Hlavní píst bude u hydraulické lunety napojen na hydraulický akumulátor. Pomocí dvou ventilů bude možné hydraulický válec libovolně zvedat nebo spouštět. Vracení pístu je řešeno tažnou pružinou. Oba boční písty budou ovládané mechanicky přes převodovky.

V dolní části lunety bude otvor pro uchycení hydraulického válce a vzájemné spojení dílů těla lunety. Na každé straně bude samostatný blok s ventily, akumulátorem a zdrojem tlakové energie. Hydraulické lunety potom budou spojeny s hydraulickým agregátem hydraulickým rozvodem, tj. hydraulickými trubkami a hadicemi, rychlospojkami. Posuv po loži řešen převodovkou s elektrickým pohonem

### Dílčí závěr

Z výše uvedeného technologického postupu a rozboru časových náročností jednotlivých vybraných typů klikových hřídelí je zřejmé, že ustavování zalomené hřídele představuje v průběhu její výroby značnou časovou náročnost a tudíž její automatizace, respektive urychlení tohoto procesu nemalou měrou přispěje k efektivitě výroby klikové hřídele. Současná technologie ustavení klikového hřídele, resp. jeho obrábění, tak jak ji popisuje úvod textu, je perspektivně nevyužitelná. Je nezbytné hledat zásadně jinou konstrukci lunety, která by umožnila aktivní automatické řízení oscilační lunety během otáčení.

### 3 Stanovení cílů doktorské práce

Práce je zaměřena na výzkum a vývoj nového produktu – **automatického řídicího systému** - pro zajištění efektivnosti procesu výroby sestav zalomených hřídelí.

Hlavním cílem práce je výzkum a vývoj kompletně nového produktu - automatického systému řízení lunet pro vyvažování klikových hřídelí v průběhu procesu obrábění. Problematika automatického procesu vyvažování představuje multidisciplinární projekt spočívající v řešení dílčích cílů:

Dílčí cíle:

- **Koncepce návrhu řešení**
- **Návrh konstrukce prototypu ustavování řídicího systému**
- **Vývoj prototypu ustavování řídicího systému**
- **Testování a návrh změn**

Řešení je založeno na použití aktivně řízených oscilačních lunet, které budou řízeny v závislosti na výchylkách mezi čely zdvihů.

Práce se soustředí na model klikové hřídele, chování klikové hřídele v různých polohách a při natočení (jelikož osa hřídele je často vychýlená z horizontální polohy) a vliv těchto jevů na výsledné výchylky čel zdvihů.

Základním problémem jsou nepřesnosti projevující se při opracování klikových hřídelí projevujícím se tzv. dýcháním. Dýchání hřídelí při otáčivém pohybu během opracování je způsobeno pružností hřídelí, nepřesnostmi vzniklými při nalisování ložiskových čepů, jejich hmotností a dále tím, že ideální osa otáčení nesouhlasí s osou hřídele. Je-li však hřídel řádně ustaven (vyvážen), potom při jeho otáčení nedochází k nechtěnému dýchání mezi libovolnými sousedními rameny hřídele (vzdálenost mezi rameny je trvale konstantní). Tohoto stavu se snaží obsluha obráběcích strojů dosáhnout v současnosti pouze vhodným *ručním nastavováním* podpěrných sil oscilačních lunet. Vzhledem k velkým rozměrům hřídelí (délka až 14000mm, hmotnost až 160 tun) a současnému způsobu měření dýchání tj. přímo-ukazujícími mikrometry bez elektrického výstupu je vyvažování velmi komplikované a potřebný čas je úměrný zkušenostem a schopnostem obsluhy obráběcích center.

#### 3.1 Popis jednotlivých etap návrhu

Konečným cílem je automatizace procesu vyvažování klikového hřídele během celého procesu ustavení a obrábění. Práce je proto rozdělena do několika etap řešení.

V průběhu první části řešení proběhne výzkumná část spojená s návrhem koncepčního řešení a matematickým modelem celého systému pro účely simulace a ověření správnosti navrhovaného řešení.

##### **Koncepce návrhu řešení**

Předmětem této etapy je definice vhodných obráběcích technologií pro návrh optimální varianty architektury celého systému a výzkum matematického modelu popisujícího základní souvztahnosti. Výstupem této etapy je základní popis návrhu struktury systému.

V etapě je proveden základní rozbor a stanovení požadavků na výrobek (rozměry, materiály, tuhost a přesnost opracování) a dále výrobních podmínek a technologií.

Výsledkem úvodní etapy je návrh koncepce řešení pro automatické řízení lunet.

### **Návrh konstrukce prototypu řídicího systému**

Předmětem této etapy jsou dvě základní části návrhu – hardwarová a softwarová.

Na základě přesné definice jak typového klikového hřídele, tak výrobní technologie, je nutné zpracovat podrobný matematický model popisující podpíraný klikový hřídel, který umožní sledovat odezvy dýchání na změny podpěrných sil lunet respektive na změny poloh podpěrných válců lunet. Poznamenejme, že zanedbáme-li vzhledem k nízkým otáčkám dynamické projevy hřídele, lze vztahy mezi výstupy - podpěrnými silami lunet (polohami lunet) a vstupy – dýcháním ramen popsat kvazi-statickým modelem založeným na matici tuhosti příslušné ke vstupům a výstupům modelu.

Pro zefektivnění tohoto přístupu je na základě vyvinutého matematického modelu vytvořen počítačový simulátor soustavy „klikový hřídel, lunety, soustruh“ (KHLS) pracující ve zrychleném čase, který umožní nejen výzkum a vývoj různých variant vyvažování a jejich konfrontaci se stávající praxí, ale i návrh a ověření nové strategie automatického vyvažování hřídele „polohováním“ lunet.

Souběžně s matematickým modelováním proto proběhly etapy návrhu dalších technických prostředků prototypového řídicího systému:

- Návrh instrumentace a subsystému aktivního řízení lunet.
- Návrh modulů pro měření „dýchání“ ramen klikového hřídele s bezdrátovou komunikací s centrální řídicí jednotkou.
- Návrh prostředků komunikace mezi stávajícím řídicím systémem a nově vyvíjeným prototypovým řídicím systémem.
- Návrh konstrukce lunety
- Návrh řídicího systému řízení lunet

### **Vývoj prototypu řídicího systému**

Předmětem etapy je kompletní stavba prototypového zařízení aktivně řízených lunet. Prototypový automatický systém aktivního řízení lunet je instalován ve firmě Heavy Machinery a.s. V době závěrečných zkoušek bylo zařízení poskytnuto na nezbytně nutnou dobu pro účely a testování, ladění, indikaci vad a další vývojové činnosti.

Po výběru vhodné technologie je v rámci etapy provedena příprava technologie, kontrola konstrukčního řešení a provozních parametrů vybrané technologie, provedeny doplňující konstrukční práce a výpočty, kontrola funkčnosti jednotlivých komponentů výrobní technologie a další podpůrné práce za účelem kompletace a zprovoznění prototypu na výrobní technologii.

Etapa bude zakončena fyzickou instalací prototypu ověřeného řídicího systému na simulátoru KHLS na reálnou technologii obrábění pro další praktické testování.

### **Testování a návrh změn**

Cílem této etapy je testování funkčnosti řídicího systému za účelem identifikace chyb v softwarové i hardwarové části prototypu a návrh jejich odstranění.

Zaměření prací bude na oživení všech plánovaných funkcionalit ŘS, které po instalaci systému na obráběcím stroji může systém vykazovat.

### **3.2 Novost navrhovaného řešení**

Výše popsaný systém automatického řízení lunet je unikátním řešením na světovém trhu. V současnosti neexistuje analogické řešení, které by nabízelo alternativní řešení automatizace procesu vyvažování klikových hřídelů při obrábění.

Problémy současné technologie výroby klikových hřídelí platí pro všechny světové výrobce. Nejpokrokovější řešení v současnosti nabízí německá firma Waldrich Siegen GmbH, která podporuje bezdrátovou komunikaci s mikrometrickými senzory dýchání ramen hřídele. Výstup přenosu naměřených dat však slouží pouze k odečtu hodnot a následné **manuální korekci nastavení podpěrných lunet**. Proces vyvažování tedy není automatizován.

Uvedený systém je novinkou na globálním trhu. V současné době žádný výrobce obráběcích center ani organizace dodávající tzv. „support“ nebo automatizaci nenabízí obdobu navrhovaného řešení, které je předmětem této doktorské práce.

Výsledky projektu budou chráněny mezinárodním patentem.

### 3.3 Přínosy pro uživatele

Instalace navrhovaného systému odstraní v naprosté většině možnost vzniku rozměrových odchylek, ztrátu kapacit, snižuje materiálovou a energetickou spotřebu, snižuje nároky na obsluhu stroje.

Mimo snížení materiálové náročnosti dojde samozřejmě i ke snížení potřebného technologického času na opracování, protože stroj není třeba neustále seřizovat a hřídele vyvažovat.

Aktivní využití automatizace vyvažování hřídele při obrábění umožní zaměstnat i méně zkušené pracovníky a snižuje rizika vyplývající z nezkušenosti obsluhy.

- úspora nákladů při opracování
- snížení výrobních časů
- zvýšení kvality rozměrových parametrů
- zvýšení výrobních kapacit
- snížení požadavků na odbornost a zkušenosti obsluhy
- snížení rizik vzniku nejakostní výroby spojených s lidským faktorem
- zvýšení bezpečnosti obsluhy obráběcího stroje

#### 4 Návrh nové koncepce řešení-teoretická, laboratorní část

Pro ověření závěrů teorie aktivního řízení oscilační lunety bylo nezbytné ještě před její aplikací vytvořit z poskytnuté výkresové dokumentace geometrický model klikové hřídele, z něj matematický model klikového hřídele. Jako prostředek napětově-deformační analýzy byla zvolena metoda konečných prvků (dále jen MKP).

Protože modely vytvořené pomocí MKP mají příliš vysoký počet stupňů volnosti, je třeba provést redukci počtu stupňů volnosti tak, aby statické a i dynamické vlastnosti byly zachovány. Cílem je tedy vytvoření redukovaného modelu s počtem stupňů volnosti  $n < 100$ .

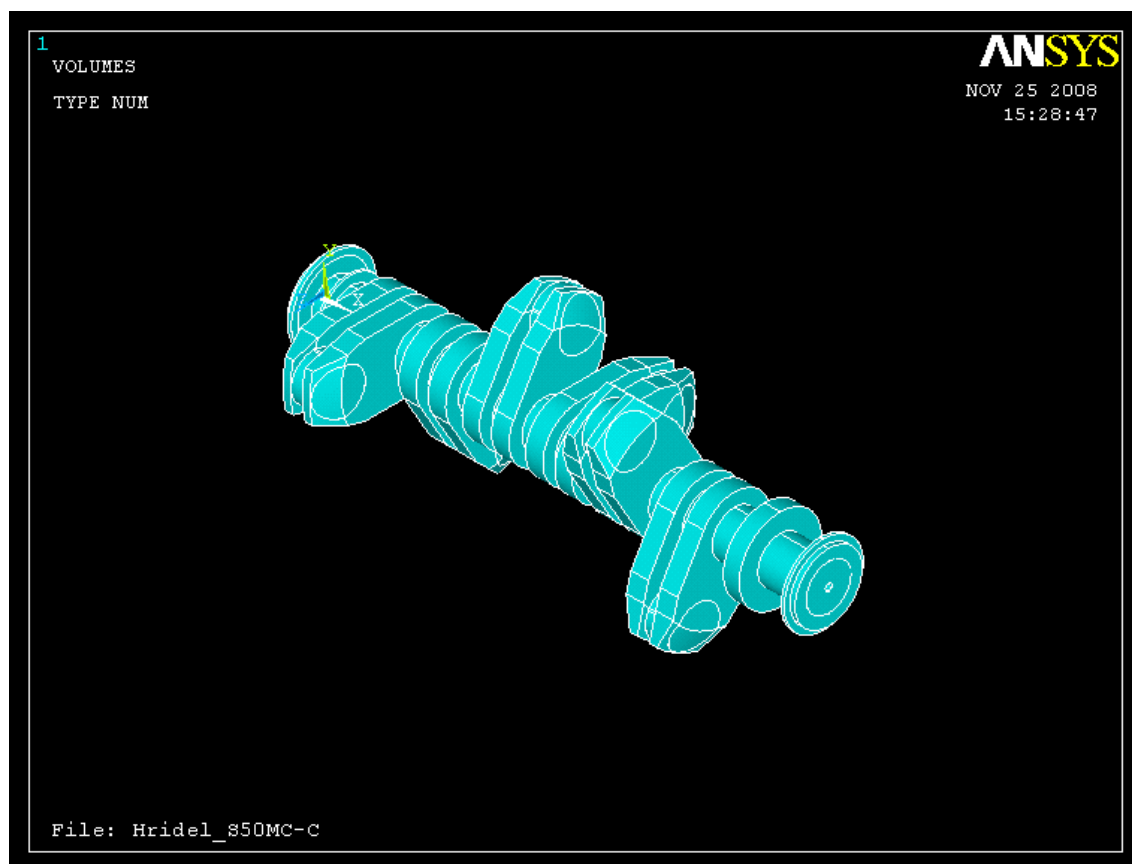
Pro ověření správnosti návrhu modelu je nezbytné v konečné fázi provést srovnávací měření na reálném klikovém hřídeli.

##### 4.1 Matematický popis klikového hřídele

Použitá metoda matematického popisu klikového hřídele je založena na zcela jiném principu než analytické metody pružnosti. Zatímco analytické metody jsou založeny na diferenciálním a integrálním počtu, použitá MKP je založena na obecně méně známém počtu variačním, hledá minimum nějakého funkcionálu[11].

##### 4.2 Geometrický model

Z poskytnuté výkresové dokumentace byl vytvořen geometrický model klikové hřídele v programovém paketu Catia V5. Pro výpočtové potřeby byly zanedbány detaily jako malá zaoblení. Model byl přenesen do programového paketu Ansys (obr. 4.1), kde byl geometrický model použit pro vytvoření modelu matematického. [12]



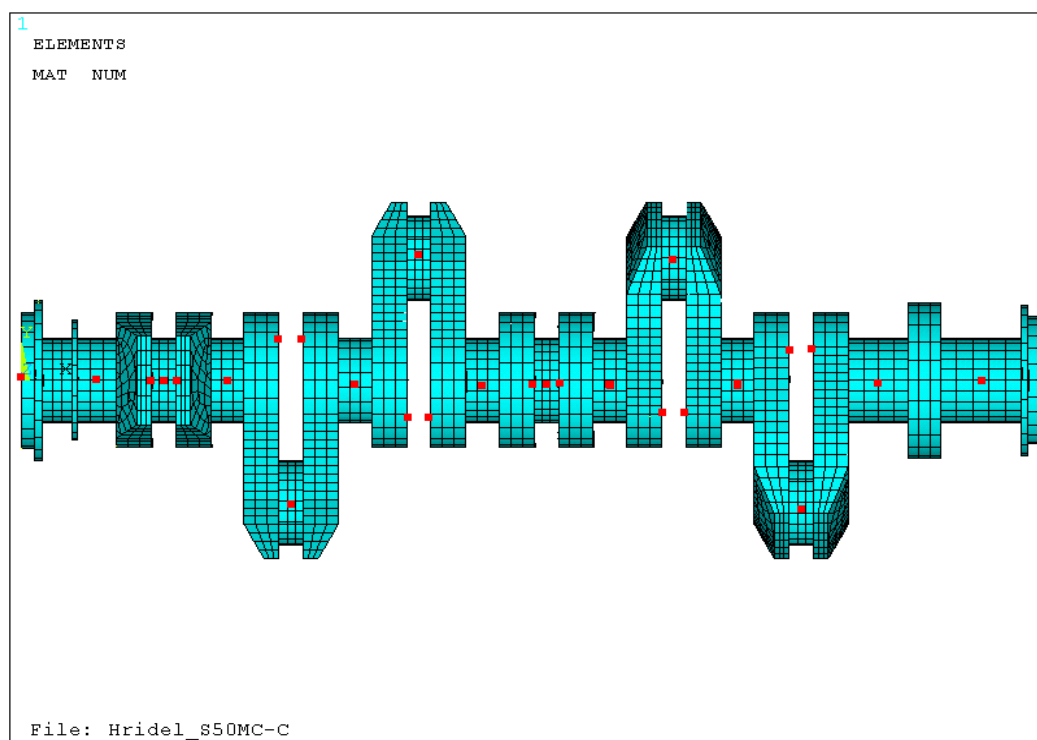
Obr. 4.1 Geometrický model hřídele [12]

### 4.3 FEM model

Matematický model klikového hřídele je vytvořen pomocí solidových brickových prvků s kvadratickým popisem. Kvadratické prvky jsou použity pro přesnější výsledek, zatím co to, že jsou zvoleny prvky typu brick je z toho důvodu, že výpočtů bude počítáno velké množství se stejným modelem, proto je vhodné, aby model vystihoval reálné dílo co nejvěrohodněji, ale zároveň měl co nejméně stupňů volnosti. Proto byl použit prvek SOLID95 z databáze programového balíku ANSYS 11 obr. 4.1. [30]

### 4.4 Kondensovaný model klikového hřídele

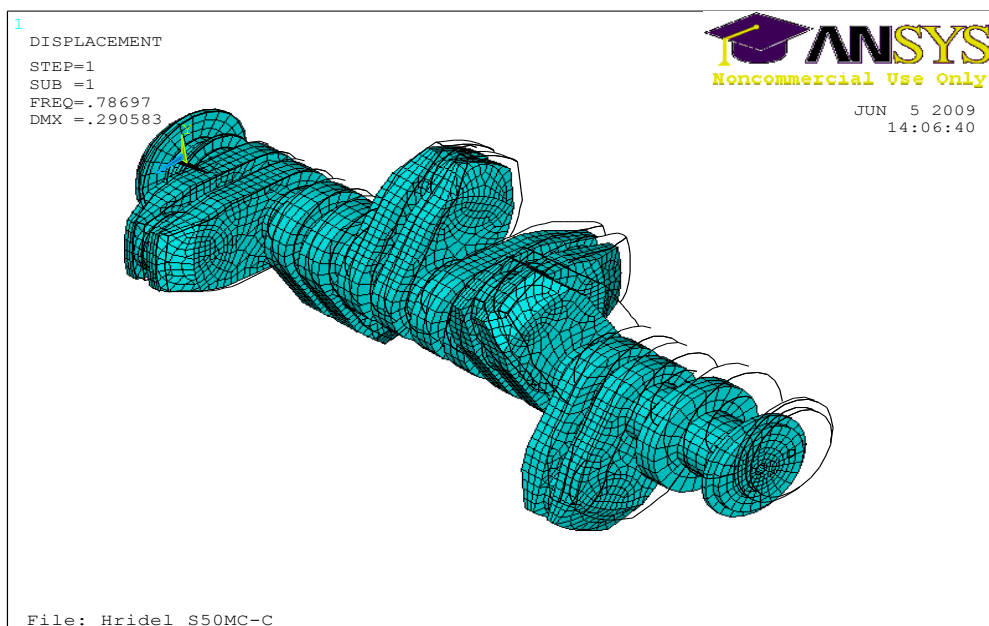
Navržený způsob řízení a proces obrábění je možné simulovat a ověřovat virtuálně a k tomu je zapotřebí vhodný matematický model. Protože modely vytvořené pomocí metody konečných prvků (MKP) mají z hlediska řízení vibrací příliš vysoký počet stupňů volnosti, je třeba provést redukci počtu stupňů volnosti tak, aby statické a v lepším případě i dynamické vlastnosti byly v určitém frekvenčním intervalu budících frekvencí zachovány. Cílem této zprávy je vytvoření redukovaného modelu s počtem stupňů volnosti  $n < 100$ . Protože aktivně řízené síly budou i v podporách, je třeba pro vytvoření matematického modelu uvažovat místa aktivních podpor jako volná, a proto jediné nulové posuvy bude hřídel mít v místě upnutí do sklíčidla soustruhu, tj. na levé straně obr.4.5. Ve stejném obrázku jsou vyznačena i místa redukce, tj. bodů, jejichž zobecněné posuvy ve třech směrech odpovídají zachovaným stupňům volnosti. Zachované stupně volnosti musí minimálně odpovídat místům snímání stavových veličin (výchylek, rychlostí a zrychlení) a místům působení zobecněných aktivně řízených podporových sil.



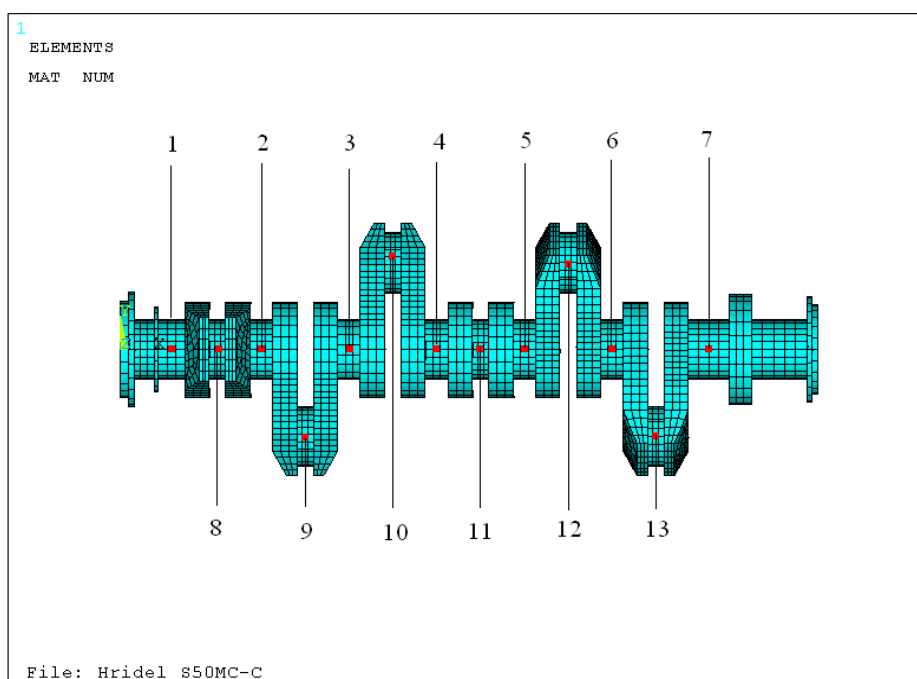
Obr. 4.2 Redukce počtu bodů [12]



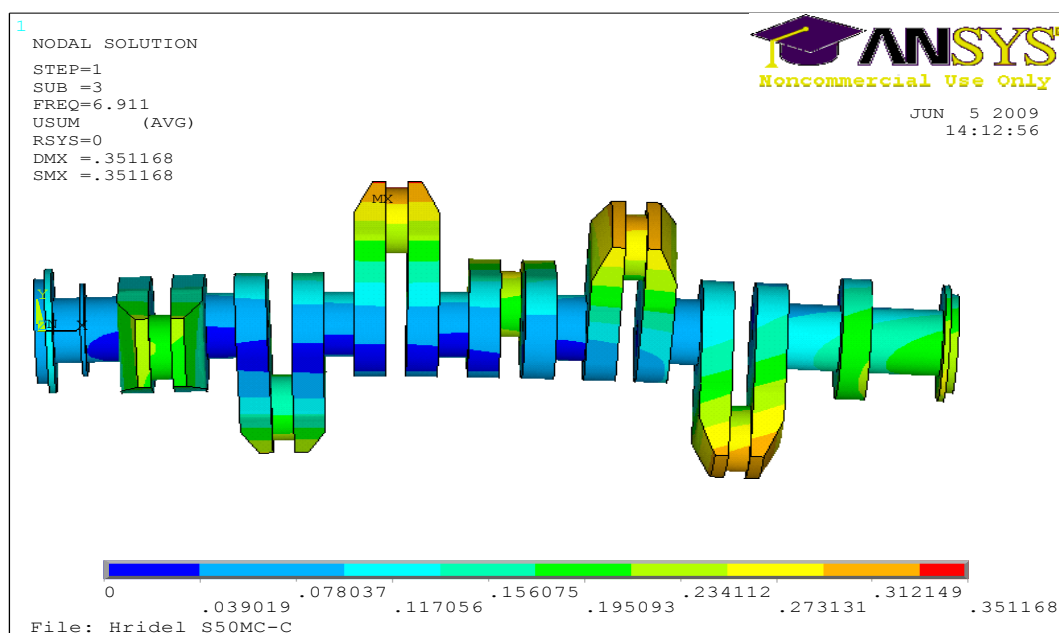
Pro určení vlastních čísel (kvadrátů vlastních frekvencí-předpokládáme symetrické koeficientové matice a komutativní matici tlumení) a tvarů kmitu (vlastních vektorů) byl vytvořen model v komerčním SW ANSYS obr. 4.6, který pracuje na bázi MKP.



Obr. 4.3 Tvary kmitů hřídele [12]



Obr. 4.4 Model vytvořený pro analýzu pomocí MKP a uzly redukce [12]



Obr. 4.5 Barevné vyjádření příslušného tvaru kmitu 4 [12]

#### 4.5 Kvazistatické řešení

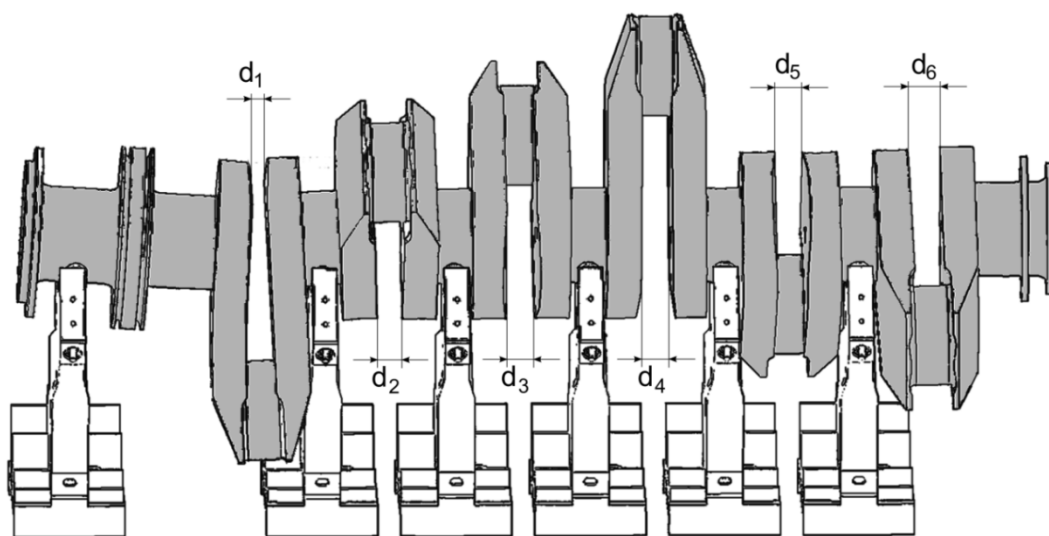
Kvazistatickým řešením máme na mysli řešení statického problému zatížení klikového hřídele, avšak v různých polohách, tzn. při měnícím se úhlu natočení. Vycházíme z podmínky rovnováhy vyjádřené v souřadnicovém systému spojeném s hřídelem (úhel natočení je nulový-na začátku jsou oba systémy totožné). Lze konstatovat, že byla zpracována metodika tvorby statických a dynamických modelů klikových hřídelů s nízkým počtem stupňů volnosti, které mají spektrálně-modální vlastnosti shodné s původními modely vytvořenými pomocí MKP v daném frekvenčním intervalu a v daných vybraných místech. Tato metodika byla využita pro přípravu algoritmů a příslušného SW a ověřena na modelu hřídele S50 MC-C. Ověření spočívalo mimo jiné ve srovnání výsledků získaných pomocí kondenzované matice tuhosti získané pomocí konstrukčních vzorců a matice tuhosti získané inverzí matice poddajnosti, která byla výsledkem opakovaných statických výpočtů na původním modelu.

#### 4.6 Tvorba algoritmů ustavení

Uvedená část práce obsahuje popis nové metody automatického ustavování klikového hřídele v procesu jeho obrábění. Pružná deformace je charakterizována rozevíráním sousedních ramen spojujících dva přilehlé klikové čepy s příslušným ojnicím čepem. Přesněji je požadováno, aby vzdálenost mezi protilehlými body dvou sousedních ramen ojnicního čepu (tzv. dýchání) byla při otáčení hřídele konstantní. V obecném případě je dýchání periodická funkce úhlu natočení hřídele a je závislé na seřizení lunet, které podpírají hřídel. Konkrétně, dýchání závisí především na poloze bočních pístů lunet, neboť ty definují střed otáčení hřídele v rovině os bočních pístů dané lunety. Vhodným vysunutím bočních válců můžeme tedy minimalizovat vybraná dýchání. Popis ustavovacího algoritmu pro výpočet optimálních poloh bočních pístů lunet, založeného na metodě nejmenších čtverců, tvoří hlavní výstup této kapitoly.

### Formulace problému

Jedna z nejnáročnějších fází výroby montovaného klikového hřídele je obrábění klikových čepů. Na obr. 4.6 je zobrazen klikový hřídel upnutý do soustruhu podpíraný řízenými lunetami. Základní požadavek, kladený na operaci obrábění, je dodržení předepsaných výrobních tolerancí. Klíčovým indikátorem přesnosti vyráběného klikového hřídele je tzv. dýchání, které odpovídá rozevírání sousedních ramen spojujících dva přilehlé klikové čepy s příslušným ojnicním čepem. Dýchání je způsobeno odchylkami od ideálního tvaru a proměnnou (pružnou) deformací hřídele během jedné otáčky odpovídající gravitačním a podpěrným silám působícím na hřídel. Jednotlivá dýchání jsou vyznačena na obr. 4.10 symboly  $d_i, i = 1, \dots$ . Počet dýchání  $p$  závisí na počtu ojnicních čepů konkrétního klikového hřídele a ke každému ojnicnímu čepu lze přiřadit právě jedno dýchání. Velikost dýchání  $d_i$  obecně závisí na úhlu natočení klikového hřídele  $\varphi \in [0, 2\pi)$ , tj.  $d_i(\varphi)$  je periodická funkce úhlu natočení  $\varphi$ . Je-li klikový hřídel ideálně ustaven a dokonale vyroben, potom je funkce  $d_i(\varphi)$  konstantní pro všechny  $i \in \{1, \dots$  na intervalu  $\varphi \in [0, 2\pi)$  (příslušná vzdálenost se nemění). V opačné situaci se nepřesnosti ve válcovitosti klikových čepů, nebo v chybném ustavení bočních podpěrných válců lunet (viz obr. 4.10) projevují alespoň jedním nekonstantním dýcháním. V takovém případě není možné obrábět všechny klikové čepy při fixním nastavení lunet. Obrábění jednotlivých klikových čepů se tedy nutně musí střídat se seřizováním polohy bočních válců lunet s pořadovými čísly . Kvalifikovaný soustružník v tomto procesu dosud používá „svoji osvědčenou“ iterativní strategii, jejímž konečným cílem je dosáhnout pokud možno všechna dýchání konstantní nebo alespoň dostatečně se blížíci ke konstantě.



Obr. 4.6 Upnutý klikový hřídel do soustruhu podpíraný lunetami [30]

### Matematické nástroje

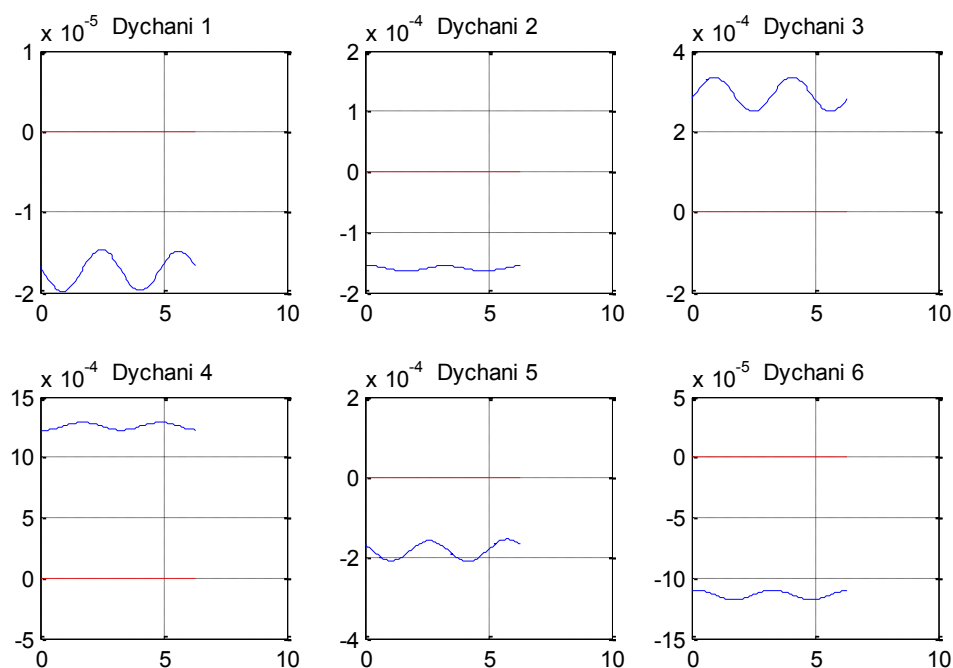
stručný přehled všech matematických nástrojů, které použijeme k řešení výše zformulovaného problému ustavování klikového hřídele:

- normy matic
- řešení soustavy lineárních rovnic metodou nejmenších čtverců
- metoda totálních nejmenších čtverců
- Fourierova řada

#### 4.7 Ověření algoritmu optimálního ustavování

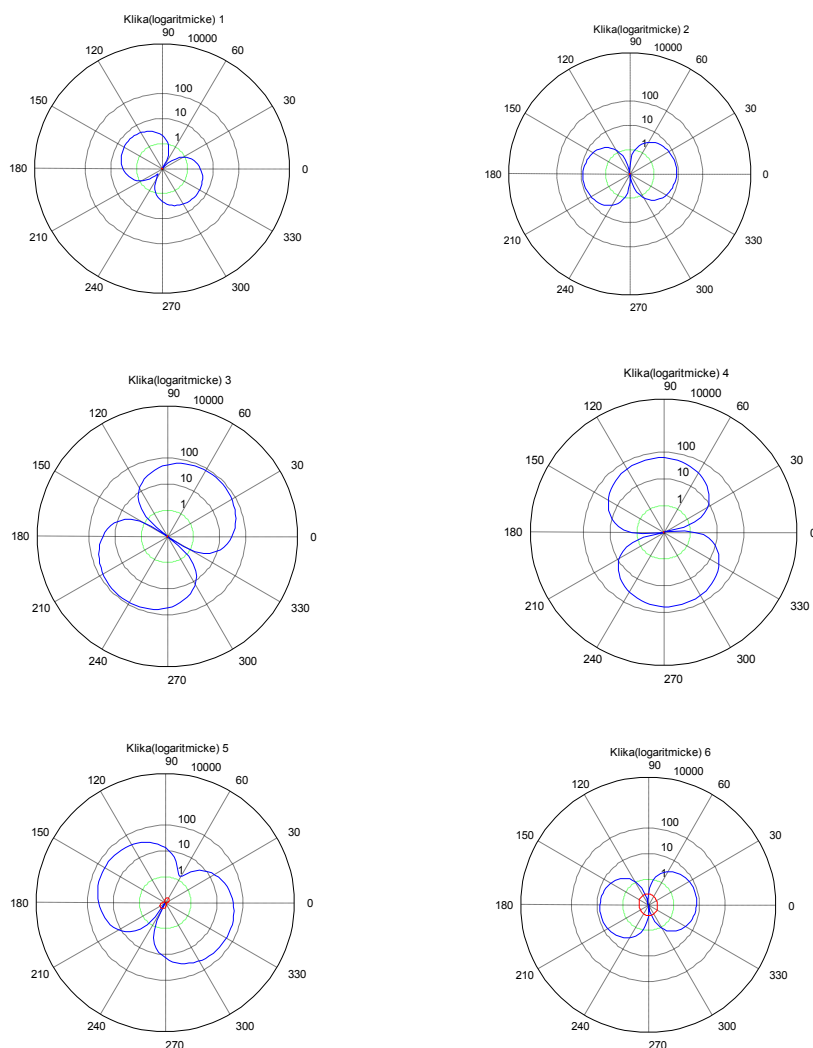
Výše navržený algoritmus automatického ustavování byl testován na virtuálním modelu klikového hřídele vyvinutého v předešlých kapitolách. Tento model umožňuje mimo jiné získávat funkce dýchání pro libovolné polohy bočních válců. Přičemž boční válce některých lunet nemusí být aktivní, tj. nemusí mít kontakt s hřídelem během celé otáčky.

Klikový hřídel s šesti klikami a podepřený šesti lunetami. Takový hřídel je schematicky znázorněn na obr. 4.6, který zobrazuje dialogové okno uživatelského prostředí virtuálního modelu. Uvažujme, že při nulovém vysunutí všech bočních válců je klikový hřídel ideálně ustaven, tj. všech šest centrováných dýchání získaných z virtuálního modelu je identicky rovných nule.



Obr. 4.7 Dýchání v počátečním ustavení hřídele [30]

Modré plné křivky, dýchání po automatickém ustavení – červené čárkované křivky



Obr. 4.8 Dýchání v polárních logaritmických souřadnicích [30]

Dýchání v počátečním ustavení hřídele – modré plné křivky, dýchání po automatickém ustavení – červené čárkované křivky.

### Dílčí závěr

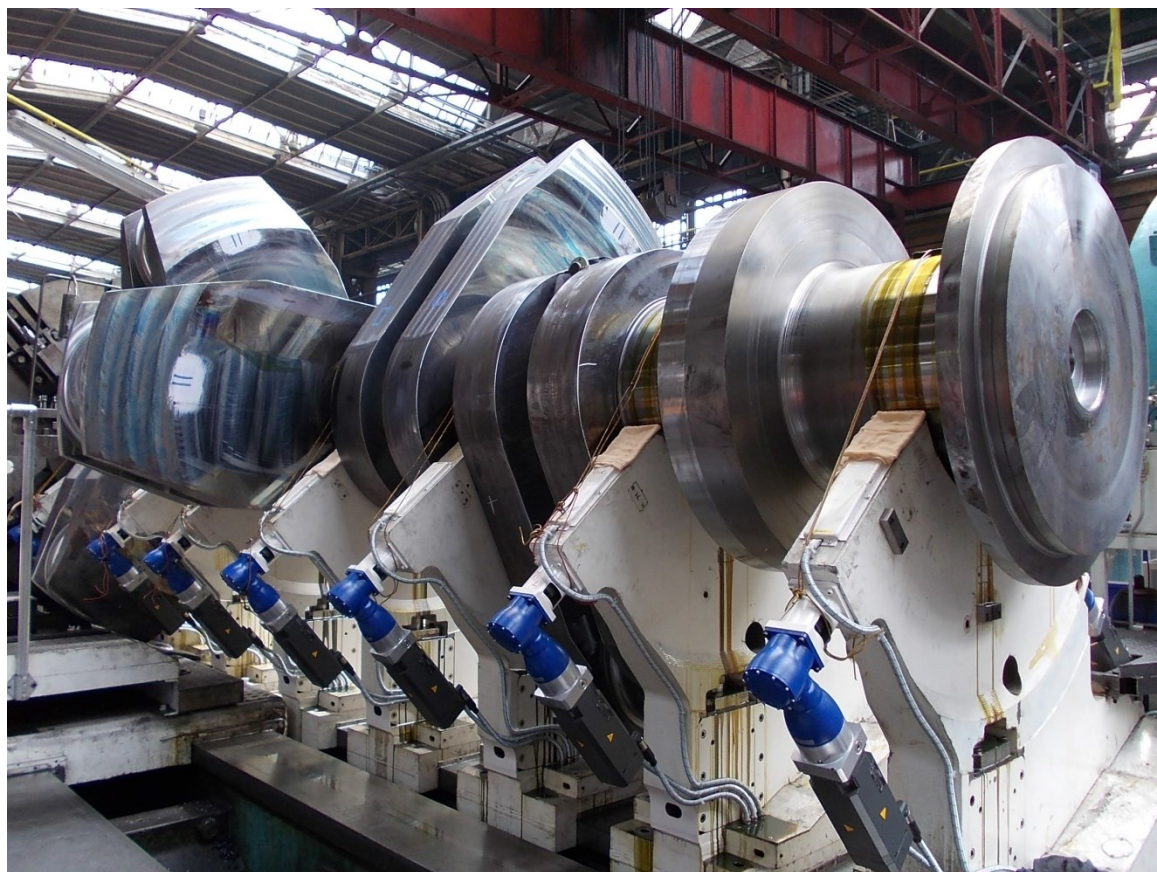
Ověření a testování vyvinutého algoritmu optimálního nastavování je provedeno metodou „model in the loop“ a „software in the loop“. Jako model klikového hřídele upnutého do soustruhu a podpíraného sadou řízených lunet je použit kondenzovaný prutový model hřídele vypracovaný v předešlé kapitole. Jeho implementace v programovém systému MATLAB umožňuje získávat funkce dýchání pro libovolné polohové a silové působení na hřídel. Rovněž navržený algoritmus ustavování s příslušným uživatelským prostředím byl implementován v programovém systému MATLAB. Výsledky provedených simulací potvrzují užitečnost a vysokou přesnost navrženého přístupu.

## 5. Návrh řídicího systému lunet

### 5.1 Řídicí systém pro vyrovnávání pružné deformace zalomených hřídelí při obrábění-část oscilační luneta

Na základě dat matematického modelu vznikl návrh hardwarových a softwarových prostředků pro automatizaci procesu vyvažování klikového hřídele během celého procesu upínání a obrábění.

Technologické centrum s aktivně řízenými oscilačními lunetami obr. 5.1 sestává ze speciálního obráběcího stroje a osmi aktivně řízenými oscilačními lunetami. Navržený ŘS pro uvedené centrum sestává z řídicího systému (ŘS) REX CONTROL pro část řízení oscilačních lunet, který byl pro tuto aplikaci nově vyvinut a ŘS Sinumerik 840D navržený pro část obrábění, kde je též řešena výkonová elektronika servopohonů lunet.



Obr. 5.1- Technologické centrum se systémem řízení lunet pro vyrovnávání pružné deformace zalomeného hřídele při obrábění [17]

Předmětem této části práce je návrh hardwarových a softwarových prostředků pro automatizaci procesu vyvažování klikového hřídele během celého procesu upínání a obrábění.

Návrh bude obsahovat:

- návrh instrumentace a subsystému aktivního řízení lunet.
- návrh modulů pro měření „dýchání“ ramen klikového hřídele s bezdrátovou komunikací s centrální řídicí jednotkou.



- návrh prostředků komunikace mezi stávajícím řídicím systémem a nově vyvíjeným prototypovým řídicím systémem.
- návrh centrální řídicí jednotky vybavené novými algoritmy řízení a komunikující se všemi nezbytnými vstupy a výstupy.

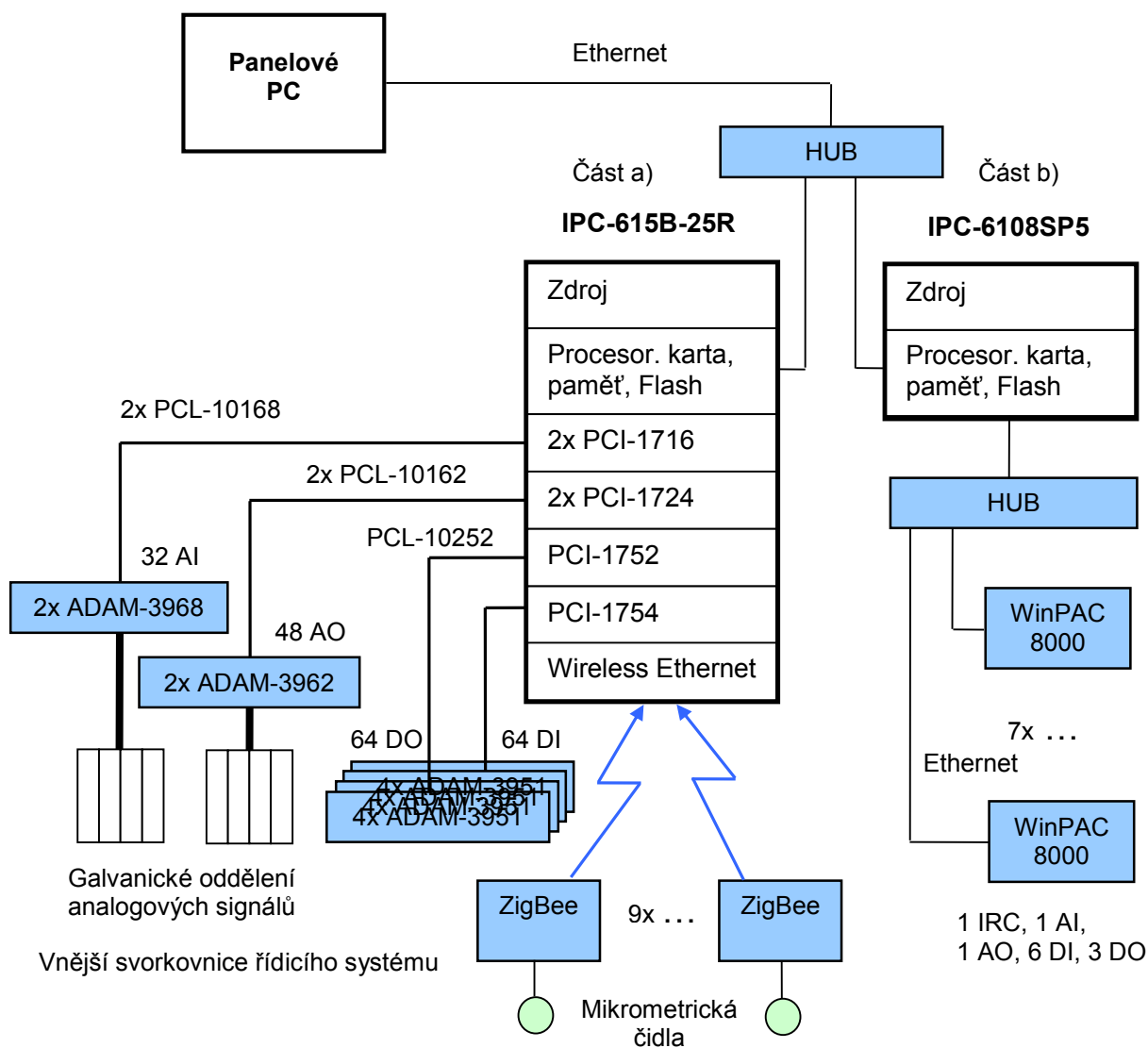
### Architektura celého řídicího systému [17]

Architektura řídicího systému je zobrazena na obr. 5.2.

Vlastní řídicí systém se skládá ze dvou částí:

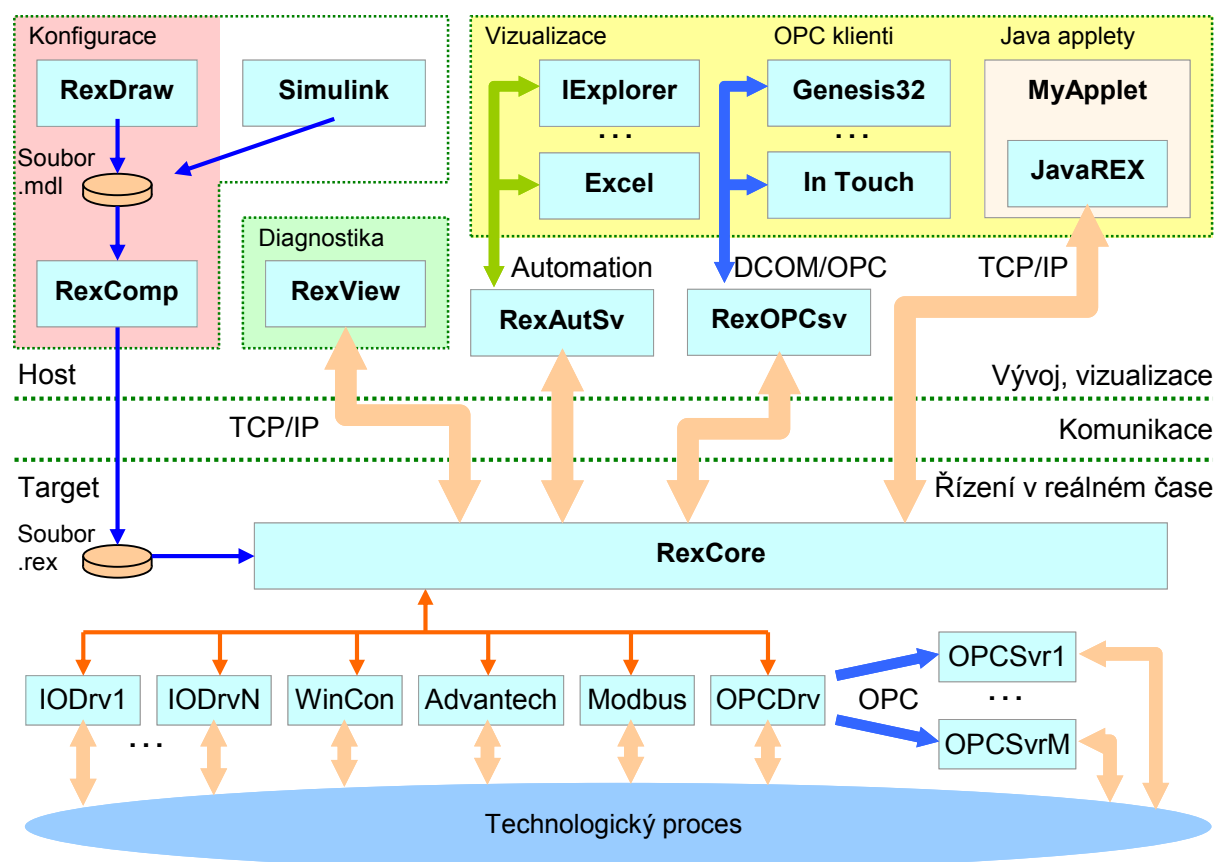
Část a) slouží pro bezdrátové měření vzdáleností listů pomocí mikrometrických čidel

Část b) pak obsahuje řídicí systém vlastní regulace lunet, polohy pístů



Obr. 5.2 - Návrh architektury řídicího systému [17]

Zjednodušená architektura řídicího systému REX navrhovaného k použití je znázorněna na obr. 5.3.



Obr. 5.3 - Architektura řídicího systému REX [17]

### Navrhovaný princip měření vzdálenosti listů

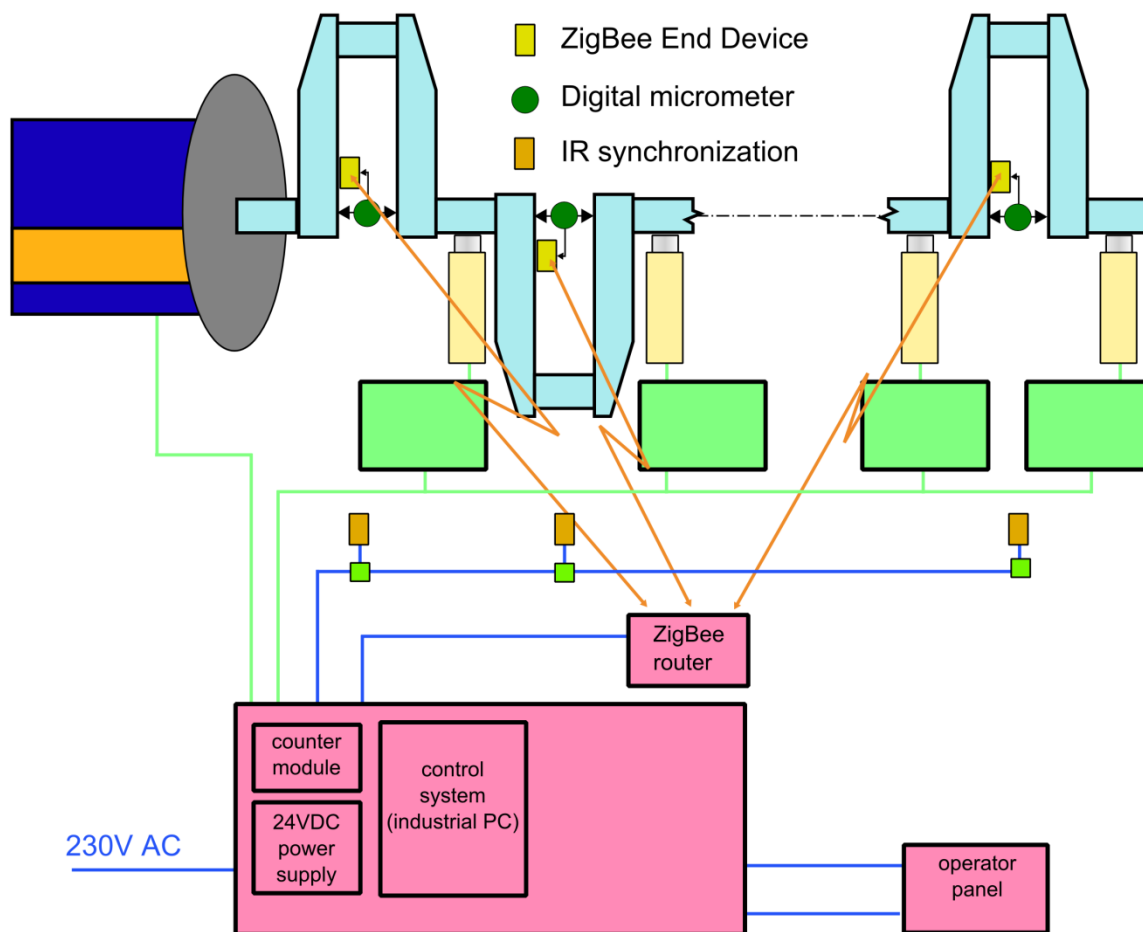
Princip měřicího systému vzdálenosti listů je schematicky znázorněn na obr.5.4.

Vlastní měření je prováděno úchylkoměry Mitutoyo řady ID-S (na obrázku znázorněny tmavě zeleným kolečkem), které budou komunikovat po sběrnici Digimatic s komunikačním modulem (znázorněno žlutým obdélníčkem). Úchylkoměr i komunikační modul se budou pohybovat spolu s rotující hřídelí. Pohybující se karta bude v reálném čase vysílat údaje o poloze pomocí bezdrátové sítě ZigBee nepohyblivým kartám REX-ARM rozmístěným podél hřídele. Nepohyblivě umístěné karty (fialová barva) jsou propojeny komunikací Ethernet a údaje z nich jsou v reálném čase přenášeny do řídicího průmyslového počítače PC (IPC). K počítači je připojen průmyslový displej s dotykovou obrazovkou. Místo IPC a průmyslového displeje může být použit též počítač typu notebook. Celkem bude dodáno 10 sad komunikačních modulů, z toho 9 sad pro měření na jednotlivých listech a 1 sada náhradní pro výměnu pro případ servisu. Každý komunikační modul bude umístěn v samostatné skřínce, pohyblivé moduly a úchylkoměry budou mít vyřešeno uchycení na obráběné



klikové hřídeli a napájení. Pro měřicí systém bude dodáno grafické operátorské rozhraní ovladatelné pomocí dotykové obrazovky (touchscreen).

Obr. 5.5 znázorňuje dva příklady mikrometrických úchylkoměrů firmy Mitutoyo s elektrickým výstupem. V obou případech je dosažená přesnost měření 0,001 mm, doba převodu pro změření jedné hodnoty je 200 ms.



	VŘETENÍK SOUDTRUHU PROGRESS
	KLIKOVÁ HŘÍDEL
	PISTONY LUNET 1 - 9
	MĚNIČE POHONŮ SIMODRIVE
	ŘÍDÍCÍ SYSTÉM CONTROL REX

Obr. 5.4 - Schéma měření vzdálenosti listů [17]



Obr. 5.5 - Příklady úchylkoměrů dodávaných firmou Mitutoyo [17]

### Hardware pro bezdrátové měření vzdálenosti listů

Pro bezdrátové měření vzdálenosti listů hřídele byly vyvinuty prvky pro vytvoření průmyslové bezdrátové sítě ZigBee. Jedná se o dva základní stavební prvky sítě, „ZigBee end device“ a „ZigBee router“ [23].

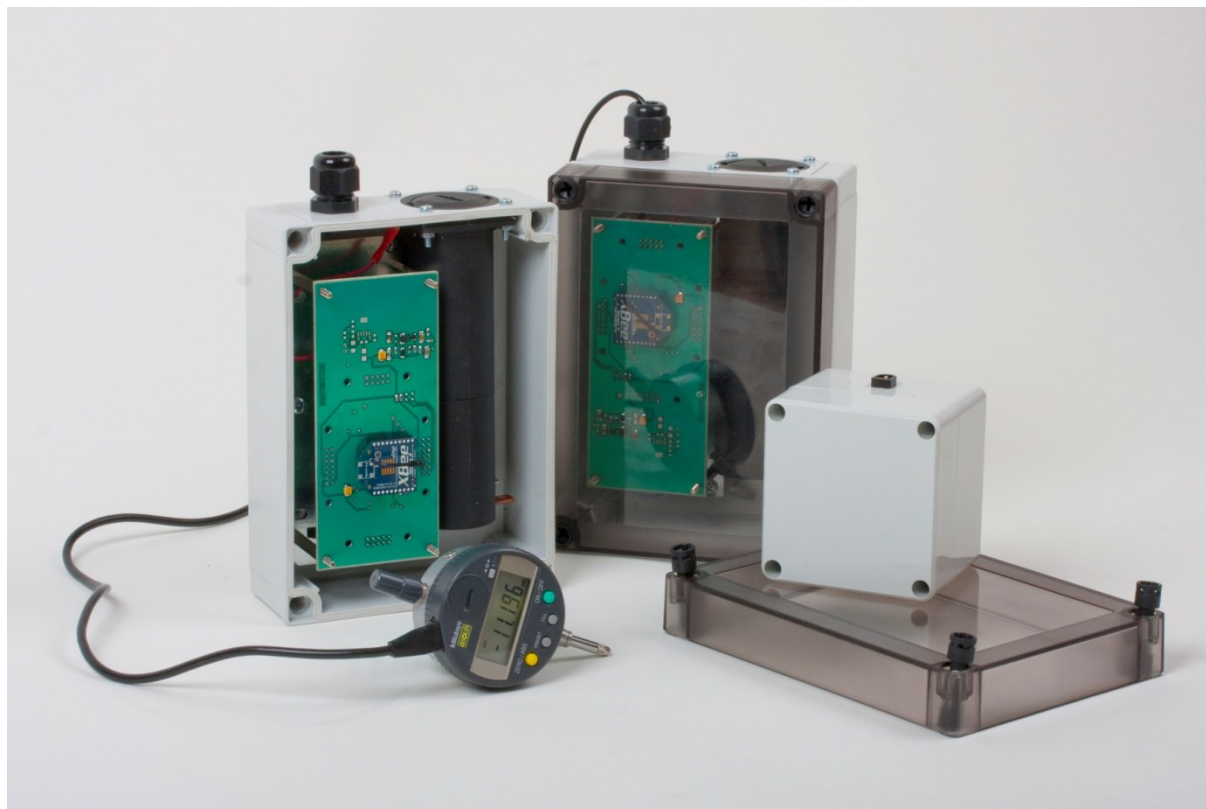
#### Zigbee end device

Slouží ke sběru dat z čidla vzdálenosti Mitutoyo. To je k němu připojeno pomocí kabelu sběrnice Digimatic. Napájení je zajištěno pomocí 2 standardních alkalických baterií typu D. Krabice s elektronikou je prachotěsná, při standardním provozu se neotvírá, pouze se vyměňují baterie uchycené v držáku, který má své samostatné víčko. Na zadní straně krabice s elektronikou jsou umístěny 2 neodymové magnety pro uchycení zařízení na hřídel. Zařízení viz obr. 5.6.

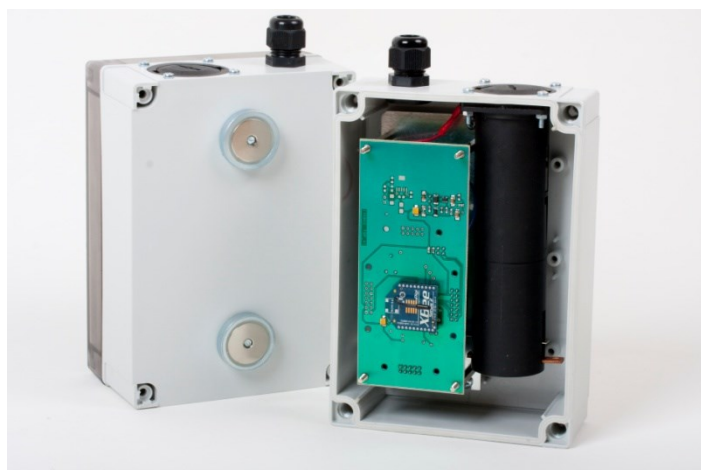
Pro uchycení čidla vzdálenosti bylo využito nově vyvinutých magnetických nastavitelných stojánků.

#### Zigbee router

Slouží ke směrování dat v síti ZigBee. Je napájen pomocí externího adaptéru, má jediný konektor pro jeho připojení. Krabice je prachotěsná. Rozmístění a uchycení routerů bude vyřešeno na základě výsledků testování propustnosti bezdrátové sítě v průmyslovém prostředí. Zařízení viz obr. 5.7 [23].



Obr. 5.6 - Snímač dýchání listů hřídele Mitutoyo a komponenty bezdrátové sítě ZigBee [23]



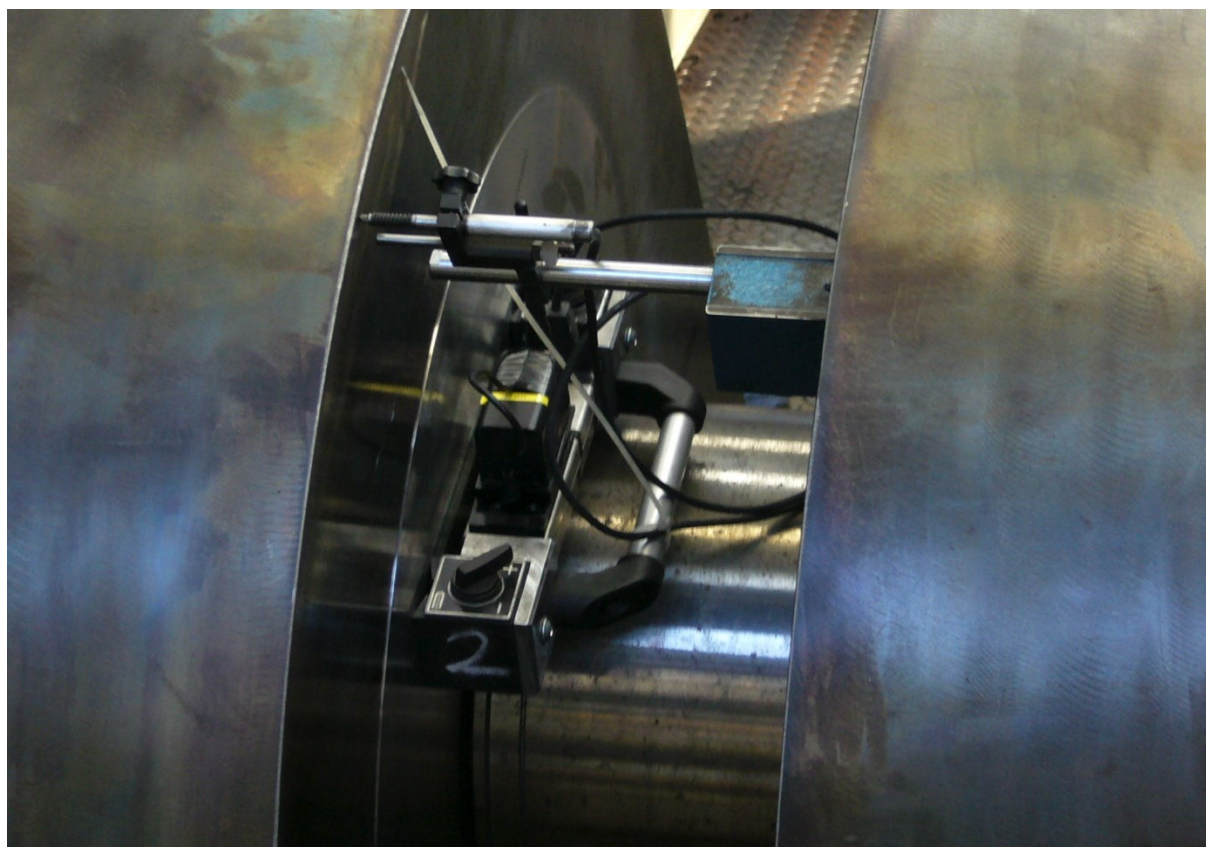
Obr. 5.7 - Vlevo detail bezdrátového vysílače naměřených hodnot, vpravo detail routeru sítě ZigBee [23]

Předpokládané technické prostředky:

- 10 ks úchylkoměrů Mitutoyo IC-C 543-250 B včetně interface DMX-1 a kabelu 905409
- 10 ks skříňka s mobilním komunikačním modulem, magnetickým uchycením na list hřídele a bateriovým napájením (end-device)
- 20 ks skříňka se stacionárním komunikačním modulem zajišťujícím směrování dat v bezdrátové síti ZigBee (router)

- 10ks skříňka s kartou REX-ARM s rozhraním Ethernet pro komunikaci s nadřazeným průmyslovým PC, včetně instalace komunikačních kabelů
- Průmyslové PC Advantech s dotykovou obrazovkou pro zabudování do panelu rozvaděče. Volitelně lze nabídnout též kloubovou konstrukci pro uchycení panelu displeje.
- Programové vybavení komunikačních sad včetně diagnostiky stavu napájení, kvality měřených dat a kvality komunikace
- Programové vybavení řídicího počítače: přenos měřených dat v reálném čase z komunikačních sad po Ethernetu pomocí protokolu Modbus TCP/IP, zpracování měřených dat v reálném čase včetně možnosti konfigurace alarmových mezí, ukládání dat do databáze, grafické operátorské rozhraní včetně ovládání pomocí dotykové obrazovky.

Pro uchycení čidla vzdálenosti se předpokládá využití nově vyvinutých magnetických nastavitelných stojánků.



Obr. 5.8 - Umístění referenčních snímačů [23]



## 5.2 Řídicí systém pro vyrovnávání pružné deformace zalomeného hřídele při obrábění - část obráběcí stroje

Aby mohlo být dosaženo požadovaných výsledků, tzn. obrábět s předepsanou kvalitou povrchu, dodržet přesný geometrický tvar a současně dodržet vysokou produkci obráběných součástí, bylo nezbytné aplikovat moderní CNC (Computer Numerical Control) řídicí systémem (dále ŘS). Navržený ŘS dokáže realizovat technologii požadovanou pro finální opracování klikového hřídele s potřebnou kvalitou i produktivitou práce. Navržený ŘS umožňuje plynulou změnu otáček a synchronizaci posuvových pohonů jak obráběcího stroje, tak posuvových pohonů oscilačních lunet. Vysoká přesnost polohování je rovněž zajištěna použitím lineárních a rotačních snímačů dále [1], kuličkového šroubu s předepnutou kuličkovou maticí, resp. použitím technologie pohonů „master – slave“ využití u osy „Z“ obráběcího stroje.



Obr. 5.9-Ovládací panel OP 010 řídicího systému Sinumerik 840D [36]

## DÍLČÍ ZÁVĚR

Na základě matematického modelu se podařilo navrhnout HW a SW prostředky pro automatizaci procesu vyvažování klikového hřídele během celého procesu ustavení a obrábění. Tyto prostředky se podařilo již odzkoušet simulací celého procesu automatického ustavení klikového hřídele.

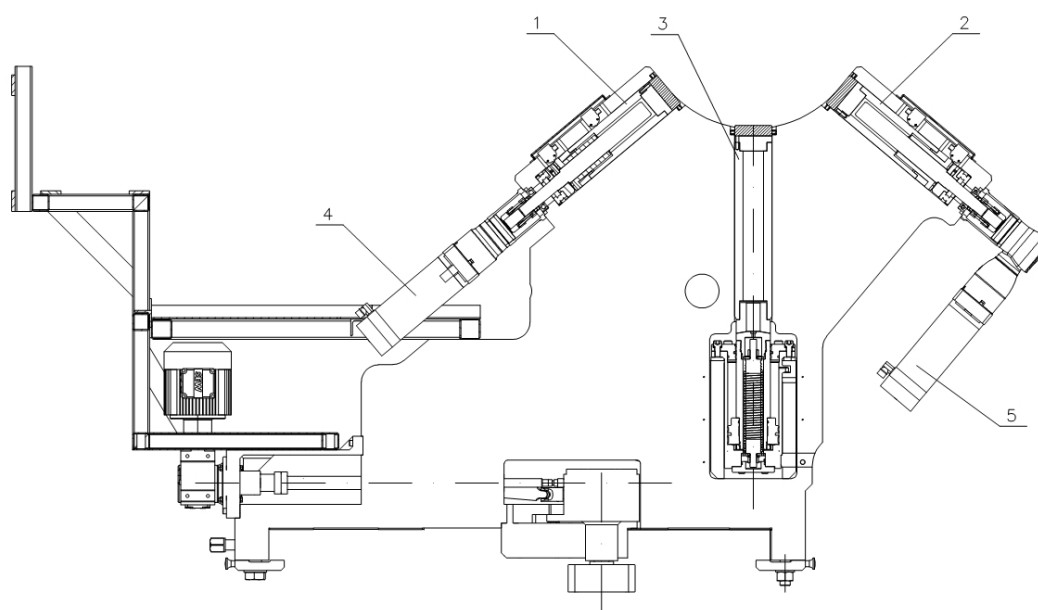
## 6. Návrh konstrukce lunety

### 6.1 Konstrukční řešení

Návrh konstrukce lunety, jeho detailní konstrukční řešení je mým vlastním návrhem a přínosem k celkovému řešení automatizovaného systému.

Aktivně řízenou oscilační lunetu tvoří násl. podsestavy:

- piston boční
- svěřenec lunety
- hydraulický válec



Obr. . 6.1 – Nákres návrhu lunety [27]

Materiál pro mechanické i hydraulické lunety je z tlustého ocelového plechu, opracován do požadovaného tvaru. V tělese mechanické lunety (viz obr.6.1) jsou umístěny tři pistony, jeden hlavní a dva boční, pomocné s mechanickým nastavením zdvihu. U hydraulické lunety jsou všechny pistony hydraulicky ovládané a napojen na hydraulický akumulátor. Pomocí hydraulických ventilů bude možné zdvihy hydraulických válců nastavení zdvihů pistonů. Vracení pistonů je řešeno tažnou pružinou. Na každé straně je samostatný hydraulický blok s ventily, akumulátorem a zdrojem tlakové energie. Hydraulické lunety jsou spojeny s hydraulickým agregátem hydraulickým rozvodem, tj. hydraulickými trubkami a hadicemi, rychlospojkami. Tento hydraulický agregát slouží jako hlavní olejová nádrž a zásobuje lunety tlakovým olejem. Zpět do nádrže je přes odpadní filtry přiveden olej ze všech lunet.

#### Piston boční

Piston boční obr. 6.1 je upevněn vazbou fixní pod ložiskem je zatížen silou vyvozenou z klikové hřídele. Tato síla je nadhodnocena na 70 000 N. Ve skutečnosti odpovídá cca 25 000 N. Síla působí na ploše vytvořené otlacením hřídele o opěrnou část pistonu (šířka opěrné části zvolena na 20 mm).

Obrázky rozložení napětí a posuvů obr.6.5,6.6,6.7.

#### Svařenec lunety

Upevnění svařence lunety obr. 6.1 je nasimulováno tak, aby odpovídalo skutečnému uložení na loži. Svařenec je zatížen těmito silami: v bočních pistonech směrem dolů v místě opěru ložiska, silami 80 000 N na přední a stejnou silou i na zadní straně. Dále silami z utahování šroubu naproti výše uvedeným silám o hodnotě 5 000 N. Třetí síla působí na spodní plochu lunety (od kazety válce) v hodnotě 110 000 N. Všechny tyto síly jsou nadhodnoceny, ve skutečnosti jsou cca 4x menší.

Obrázky rozložení napětí a posuvů níže: Výsledné maximální napětí může být zkresleno na vyšší hodnotu oproti skutečnosti z důvodu ostrých hran součástí, které matematický aparát počítá k vyšším hodnotám přímo úměrně přesnosti sítě konečných prvků.

### Hydraulický válec

Upevnění válce obr. 6.6 je na opěrné ploše u horního víka válce fixní vazbou - vetknutím (znázorněno zelenými šipkami). Na válec je nasimulovaný tlak 15 MPa, tento tlak působí na všechny vnitřní plochy pod pístem a vyvíjí celkovou sílu na píst směrem nahoru 265 000 N, je tedy předdimenzován. Opěrný díl válce je omezen v pohybu směrem nahoru a dolů (zelené šipky vpravo).

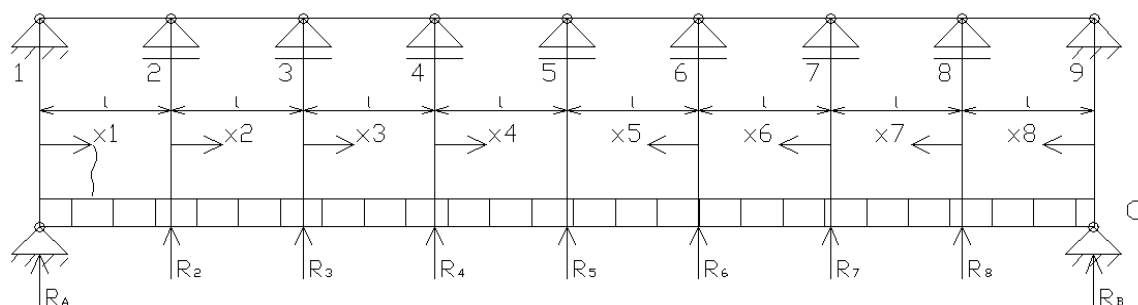
Obrázky rozložení napětí a posuvů níže: Výsledné maximální napětí je v tomto případě 256 MPa. Toto je způsobeno nepřesným vykreslením sítě konečných prvků a nachází se v ostré hraně zahlobení šroubu a to pouze v jedné díře. Další kritické hodnoty již odpovídají skutečnosti (140 MPa). Může být zkresleno na vyšší hodnotu oproti skutečnosti z důvodu ostrých hran součástí, které matematický aparát počítá k vyšším hodnotám přímo úměrně přesnosti sítě konečných prvků.

Obrázky znázorňují průběh napětí (MPa), resp. posunutí (mm).

### 6.2 Výpočet působení sil na lunety

Základním předpokladem pro stanovení hlavních prvků hydraulické lunety je výpočet tlaku potřebného pro vyrovnaní osy klikové hřídele.

Tento výpočet spočívá ve vyřešení nejméně příznivého případu, který ve výrobě bude moci nastat. V analogickém řešení kliková hřídel představuje statický nosník na podpěrách a výpočtem zjistím reakce těchto nosníků, tzn. sílu působící na jednotlivé lunety a tím potřebný tlak. Tlak je nastaven na manometru lunety, tedy na akumulátoru.



Obr. 6.2 Grafické znázornění klikové hřídele jako staticky zatíženého nosníku

Výpočet nulového průhybu pod jednotlivými podpěrami:

$$\begin{aligned}
 1) v_{R_2} &= \frac{\partial W}{\partial R_2} = 0 \\
 2) v_{R_{32}} &= \frac{\partial W}{\partial R_3} = 0 \\
 3) v_{R_4} &= \frac{\partial W}{\partial R_4} = 0 \\
 4) v_{R_{52}} &= \frac{\partial W}{\partial R_5} = 0 \\
 5) v_{R_{62}} &= \frac{\partial W}{\partial R_6} = 0 \\
 6) v_{R_7} &= \frac{\partial W}{\partial R_7} = 0 \\
 7) v_{R_{82}} &= \frac{\partial W}{\partial R_8} = 0
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Výpočet neznámých reakcí, určení intervalů neznámých a rovnic ohybových momentů:

➤ vyjádření reakcí

$$\begin{aligned}
 R_A = R_B &= \frac{1}{2} \cdot q \cdot 8 \cdot l - \frac{1}{2} \cdot (R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8) \quad q = \frac{m \cdot g}{8l} [N/m] \\
 \Rightarrow 7 \text{ neznámých} & \tag{6.2}
 \end{aligned}$$

➤ intervaly neznámých

$$x_1 \in \langle 0, l \rangle \quad M_{(x_1)} = R_A \cdot x_1 - q \cdot \frac{x_1^2}{2}$$

[6.3]

$$x_2 \in \langle 0, l \rangle \quad M_{(x_2)} = R_A \cdot (l + x_2) + R_2 \cdot x_2 - q \cdot \frac{(l + x_2)^2}{2} \tag{6.4}$$

$$x_3 \in \langle 0, l \rangle \quad M_{(x_3)} = R_A \cdot (2l + x_3) + R_2 \cdot (l + x_3) + R_3 \cdot x_3 - q \cdot \frac{(2l + x_3)^2}{2} \tag{6.5}$$



$$x_4 \in \langle 0, l \rangle \quad M_4 = R_A \cdot (3l + x_4) + R_2 \cdot (2l + x_4) + R_3 \cdot (l + x_3) + R_4 \cdot x_4 - q \cdot \frac{(3l + x_4)^2}{2} \quad [6.6]$$

$$x_8 \in \langle 0, l \rangle \quad M_{(x8)} = R_B \cdot x_8 - q \cdot \frac{x_8^2}{2} \quad [6.6]$$

$$x_7 \in \langle 0, l \rangle \quad M_{(x7)} = R_B \cdot (l + x_7) + R_7 \cdot x_7 - q \cdot \frac{(l + x_7)^2}{2} \quad [6.7]$$

$$x_6 \in \langle 0, l \rangle \quad M_{(x6)} = R_B \cdot (2l + x_6) + R_7 \cdot (l + x_6) + R_6 \cdot x_6 - q \cdot \frac{(2l + x_6)^2}{2} \quad [6.8]$$

$$x_5 \in \langle 0, l \rangle \quad M_{(x4)} = R_B \cdot (3l + x_5) + R_7 \cdot (2l + x_5) + R_6 \cdot (l + x_6) + R_5 \cdot x_5 - q \cdot \frac{(3l + x_5)^2}{2} \quad [6.9]$$

Výpočet reakce v podpěrách ( síly, jakými působí kliková hřídel na jednotlivé lunety) z potenciální energie:

$$W_P = \frac{1}{2 \cdot E \cdot J} \cdot \sum_{i=1}^n \int M_{xi}^2 dx_i \quad [6.10]$$

energie pro jednotlivou reakci:

$$y = \frac{\partial W_P}{\partial R_x} = \frac{1}{E \cdot J} \cdot \sum_{i=1}^n \int M_{xi} \cdot \frac{\partial M_{xi}}{\partial R_x} dx_i = 0 \quad [6.11]$$

$$M_{x1} = R_A \cdot x_1 - \frac{q \cdot x_1}{2} \quad [6.12]$$

$$\frac{\partial M_{x1}}{\partial R_2} = -\frac{1}{2} \cdot x_1 \quad [6.13]$$

$$y = \frac{1}{E \cdot J} \cdot \sum_{i=1}^n \int M_{xi} \cdot \frac{\partial M_{xi}}{\partial R_2} dx_i = 0 \quad [6.14]$$

$$\begin{aligned} & \int_0^l M_{x1} \cdot \frac{\partial M_{x1}}{\partial R_2} dx_1 + \int_0^l M_{x2} \cdot \frac{\partial M_{x2}}{\partial R_2} dx_2 + \int_0^l M_{x3} \cdot \frac{\partial M_{x3}}{\partial R_2} dx_1 + \int_0^l M_{x4} \cdot \frac{\partial M_{x4}}{\partial R_2} dx_4 + \int_0^l M_{x5} \cdot \frac{\partial M_{x5}}{\partial R_2} dx_5 + \\ & \int_0^l M_{x6} \cdot \frac{\partial M_{x6}}{\partial R_2} dx_6 + \int_0^l M_{x7} \cdot \frac{\partial M_{x7}}{\partial R_2} dx_7 + \int_0^l M_{x8} \cdot \frac{\partial M_{x8}}{\partial R_2} dx_8 = 0 \end{aligned} \quad [6.15]$$

$$M_{x_2} = R_A \cdot (l + x_2) + R_2 \cdot x_2 - \frac{q \cdot (l + x_2)^2}{2} \quad \frac{\partial M_{x_2}}{\partial R_2} = -\frac{1}{2} \cdot (l + x_2) + x_2 \quad [6.15]$$

$$y = \int_0^l [R_A \cdot (l + x_2) + R_2 \cdot x_2 - \frac{q \cdot (l + x_2)^2}{2}] \cdot [-\frac{1}{2} \cdot (l + x_2) + x_2] dx_i \quad [6.16]$$

Z tohoto vyplývá, že reakce  $R_A$  a  $R_b$  jsou funkcemi všech ostatních jednotlivých reakcí, a proto pro tuto metodu je řešení pomocí metody konečných prvků.

Pro složitost výpočtu pomocí MKP je použit zjednodušený výpočet:.

$$q_h = \frac{F}{n} = \frac{m \cdot g}{n} \quad p = \frac{q_h}{S} = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d^2} \quad \text{kde:} \quad [6.17]$$

kde  $n$  – počet zdvihů;  $m$  – hmotnost klikové hřídele;  $S$  – plocha pístu;  $p_2$  – tlak na píst

V konkrétním případě potom při hmotnosti klikové hřídele 40tun o 9. zdvizech a průměru pístu  $\varnothing = 80\text{mm}$  na jednu lunetu připadne tlak:

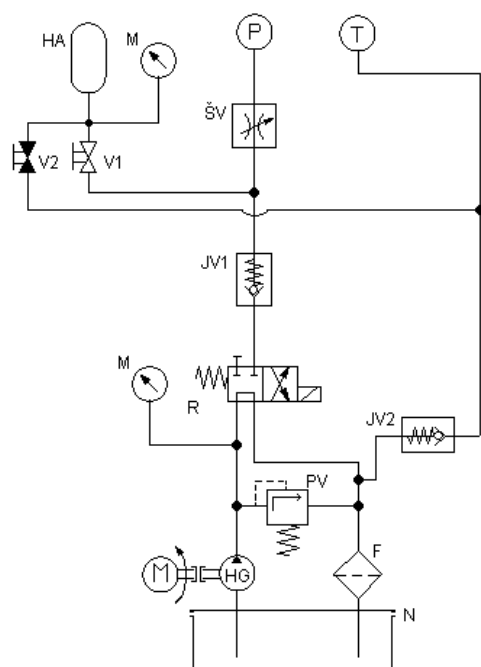
$$q_h = \frac{F}{n} = \frac{m \cdot g}{n} \quad [6.18]$$

$$p_2 = \frac{q_h}{S} = \frac{4 \cdot q_h}{\pi \cdot d^2} \quad [6.20]$$

### 6.3 Návrh prvků hydraulického obvodu

Hydraulický agregát dodá tlakový olej do hydraulického obvodu, ke kterému jsou rychlospojky připojeny lunety. Tlakovým olejem je naplněn hydraulický akumulátor na vypočítaný tlak. Hydraulické ovládání má každá luneta vlastní. Dvěma sedlovými ventily, které mají zároveň funkci oboustranného hydraulického zámku, je píst na lunetě vysouván, nebo zasouván.

Akumulátor v případě správné polohy a výšky zvednutí pístu a uzavření ventilů bude působit jako hydraulická pružina.

**LEGENDA:**

- N – Olejová nádrž
- M – Elektromotor
- HG – Hydrogenerátor
- PV – Pojistný ventil
- M – Manometr
- R – Rozváděč 2 polohový / 4 cestný
- JV1,2 – Jednosměrné ventily
- V1,2 – Uzavírací ventily pro HA
- HA – Hydraulický akumulátor
- ŠV – Škrťací ventil
- F – Filtr odpadních částic
- P – Odvod oleje z agregátu do obvodu
- T – Přívod oleje z obvodu zpět do agregátu

Obr. 6.3 – Schématické zapojení hydraulického agregátu

**6.3.1 Návrh hydromotoru, hydr. agregátu a hydr. válce**

Pro vysouvání pístu je zvolena rychlost 0,03m/s.

Hydraulický válec průměr válce  $\varnothing D = 85\text{mm}$ , průměr pístu  $\varnothing d = 80\text{mm}$ , pracovní zdvih  $l = 140\text{mm}$

Výpočet průtočného množství hydrogenerátoru:

$$Q = v \cdot S = 4v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,03 \cdot \frac{\pi \cdot 0,08^2}{4} \quad [6.21]$$

Hydrogenerátor zvolen zubový vnější, účinnost 85%, otáčky 1500/min, průtok  $Q_n = 20\text{dm}^3/\text{min}$ .

Výpočet objemu hydrogenerátoru:

$$V_g = Q / (0,85 \cdot n) \cdot \frac{Q^3}{(\eta \cdot n)} \quad [6.22]$$

Návrh hydraulického agregátu pro nejbližší vyšší průtok a tlak 16MPa s pomocným akumulátorem, elektromotorem, zvolenými prvky a příslušenstvím

- Elektromotor o výkonu 7,5kW
- Zubový hydrogenerátor o Průtoku 20dm<sup>3</sup>/min
- Hydraulický akumulátor o objemu 10dm<sup>3</sup>
- Odpadní filtr, jmenovitá čistící schopnost 10 μ m.
- Ostatní prvky

### 6.3.2 Návrh hydraulického akumulátoru lunety

Akumulátor musí udržet min. rozdíl tlaků, 0,5% a méně, aby síla působící na klikovou hřídel byla konstantní:

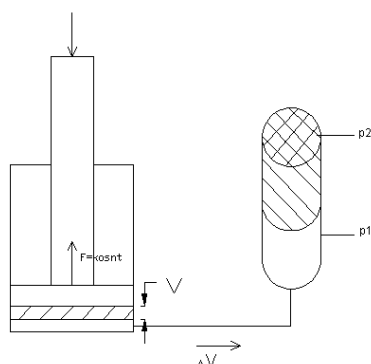
$\Delta p$  je volen 0,4bar = 40000Pa.

$$\Delta p = p_2 - p_1 \text{ je } p_1 = p_2 - \Delta p \Rightarrow p_1 \quad [6.23]$$

Plnicí tlak pro akumulátor:

$$p_0 = 0,9 \cdot p_1 \quad [6.24]$$

Výpočet akumulátoru s objemem  $V_0$ :



Obr. 6.4 – Schéma hydraulického akumulátoru

$$V = S \cdot v_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v_v \quad [6.25]$$

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{0,714} - \left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{0,714}} \quad [6.26]$$

Z vypočteného objemu plynu  $V_0$  je volen katalogový akumulátor s  $V_0$  nejbližším vyšším a to akumulátor firmy OLAER, typové označení **IHV6 – 330/90**:

Objem plynu  $V_0 = 6\text{dm}^3$ , provozní tlak = 33MPa

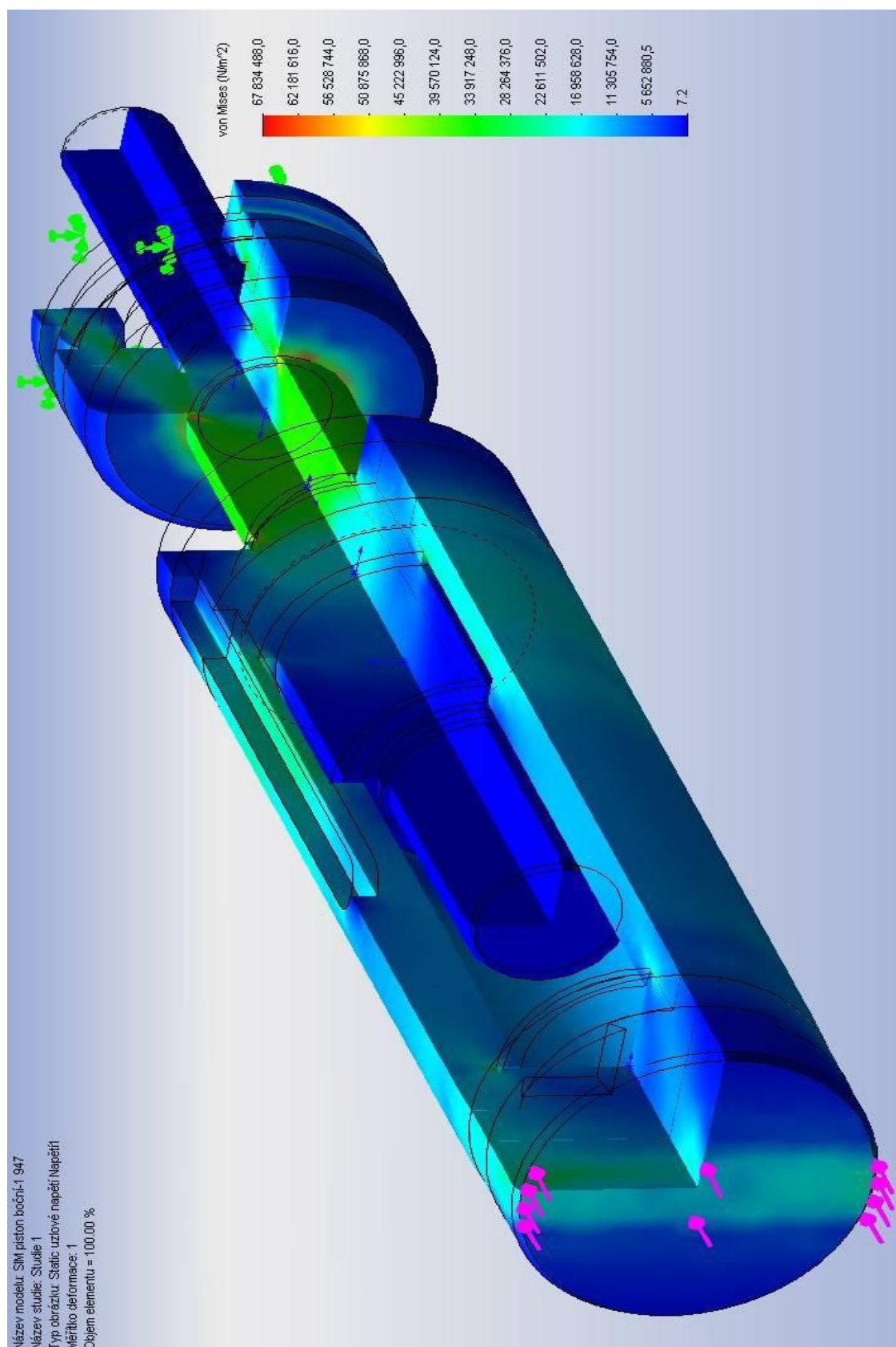
## 6. 4 Analýza napětí sestava lunet 947 Simulation

Analýza zatížení 6 lunet FR-TI1/522 (dále jen Luneta 947, popř. "díly ..." 947) byla provedena se zvolenou zalomenou hřídelí 6 S50MCC . Pro úspěšný výpočet byla tato sestava zjednodušena následujícími způsoby:

- u tělesa lunety odstraněny malé díry v místech, kde neprobíhá napětí,
- kliková hřídel byla vyhlazena a odstraněny malé díry,
- u přímo zatížených součástí (šrouby, ložiska, pistony) byla odstraněna zanedbatelná sražení,
- pro výpočet bylo nutno zjednodušit i fyzikální podmínky: celá sestava se chová jako pružná, ale byly zanedbány síly vyplývající z obrábění a moment působící na lunetu pro rotační pohyb. Celá sestava je tedy zatížena pouze vlastní hmotností. Výpočet byl proveden také pro jiné polohy zalomené hřídele a to po 10°. Pro názornost posunutí hřídele bylo skutečné posunutí 2000x znásobeno-viz obr.6.5 – 6.9.

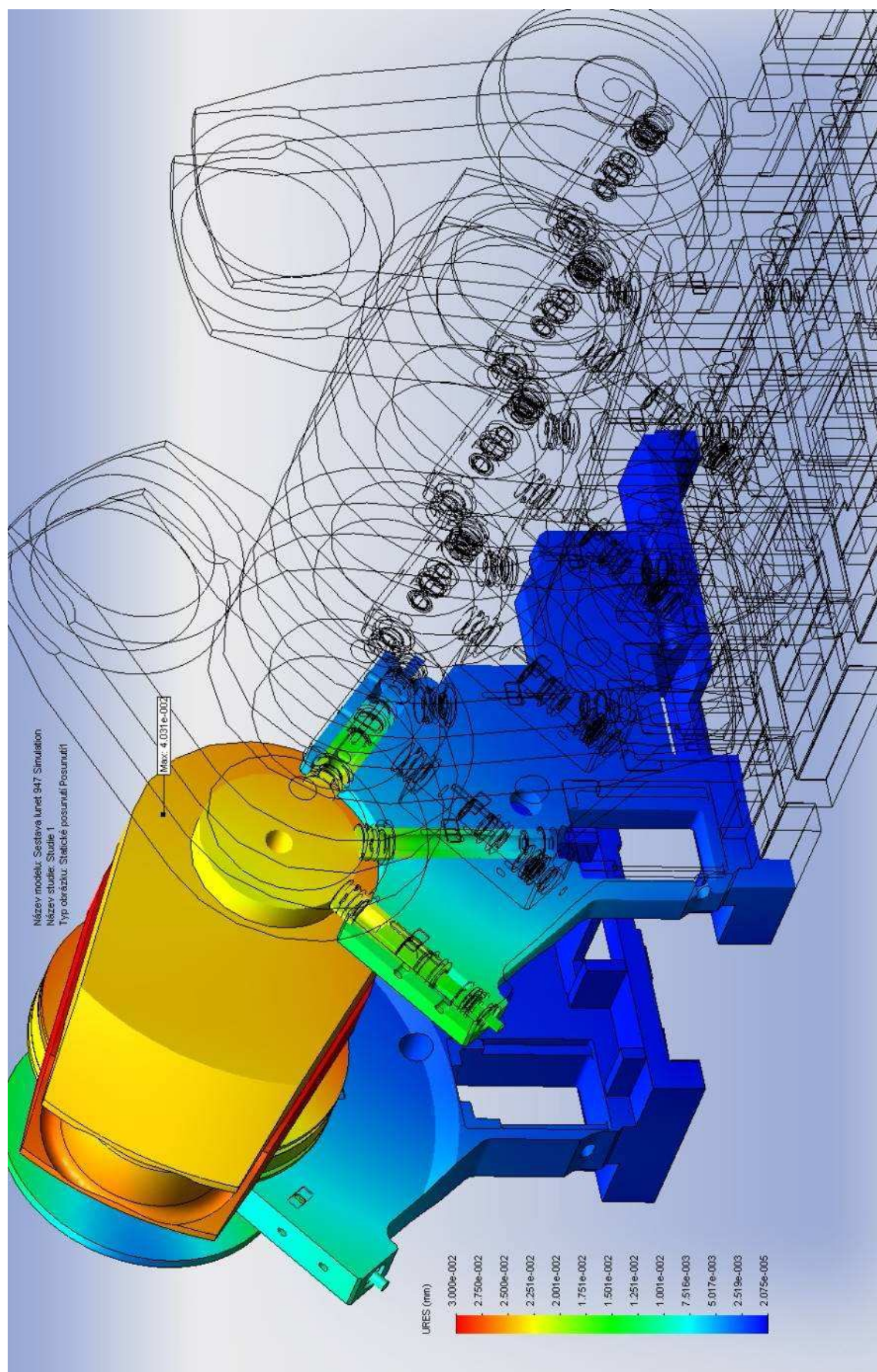
Vzhledem k velkému obsahu nejsou zmiňovány jednotlivé díly. Celkový souhrn dílů modelu a vlastností sítě, jednotek, vlastností použitých materiálů, informací o síti, zatížení, výchozích výsledků uvádím

v 11 Přílohy/[VI] Text - Analýza napětí sestava lunet 947 Simulation.

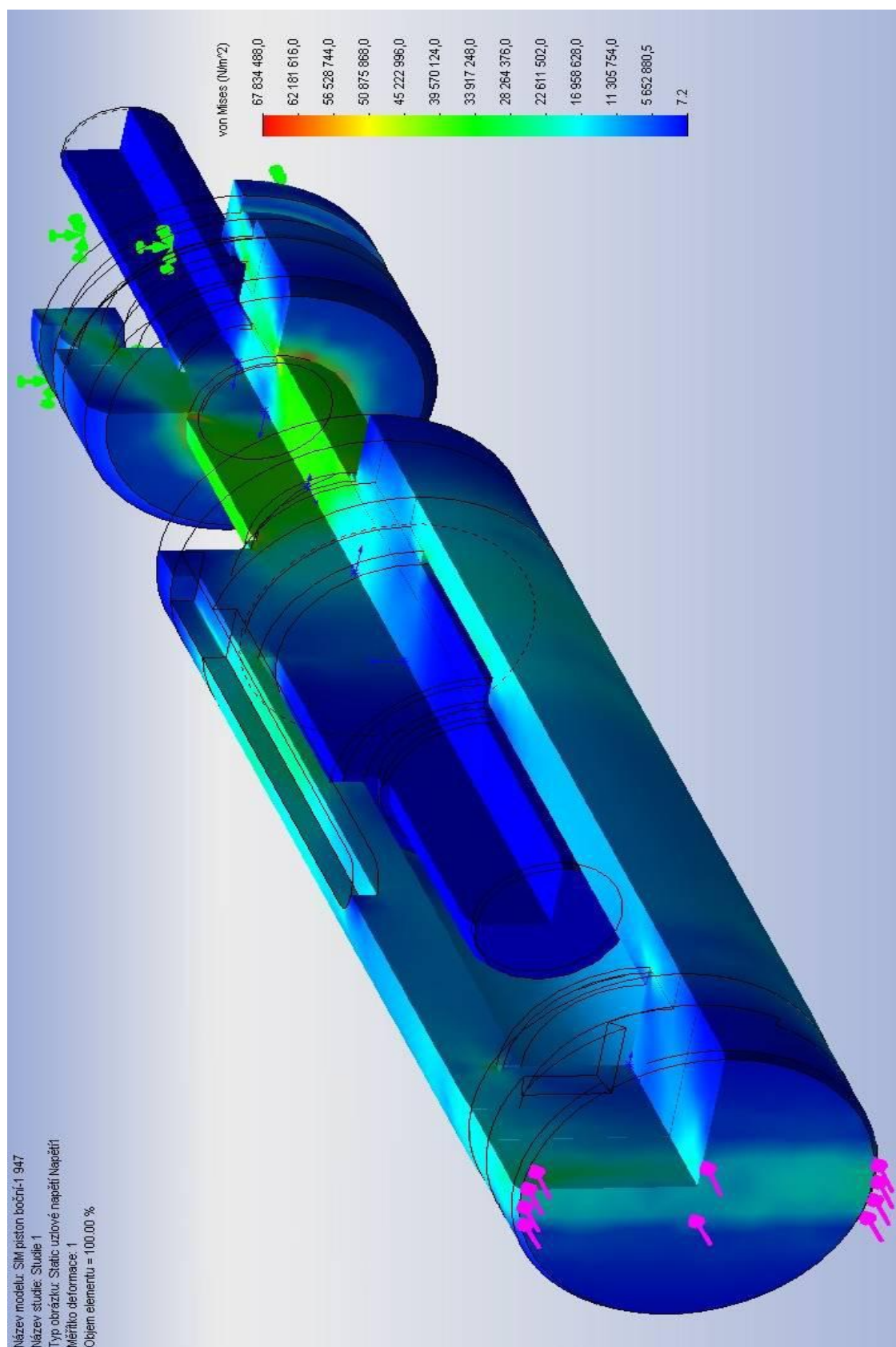


Obr. 6.5 - Piston boční





Obr. 6.6 Sestava lunet 947 Simulation-Studie 1-Posunutí

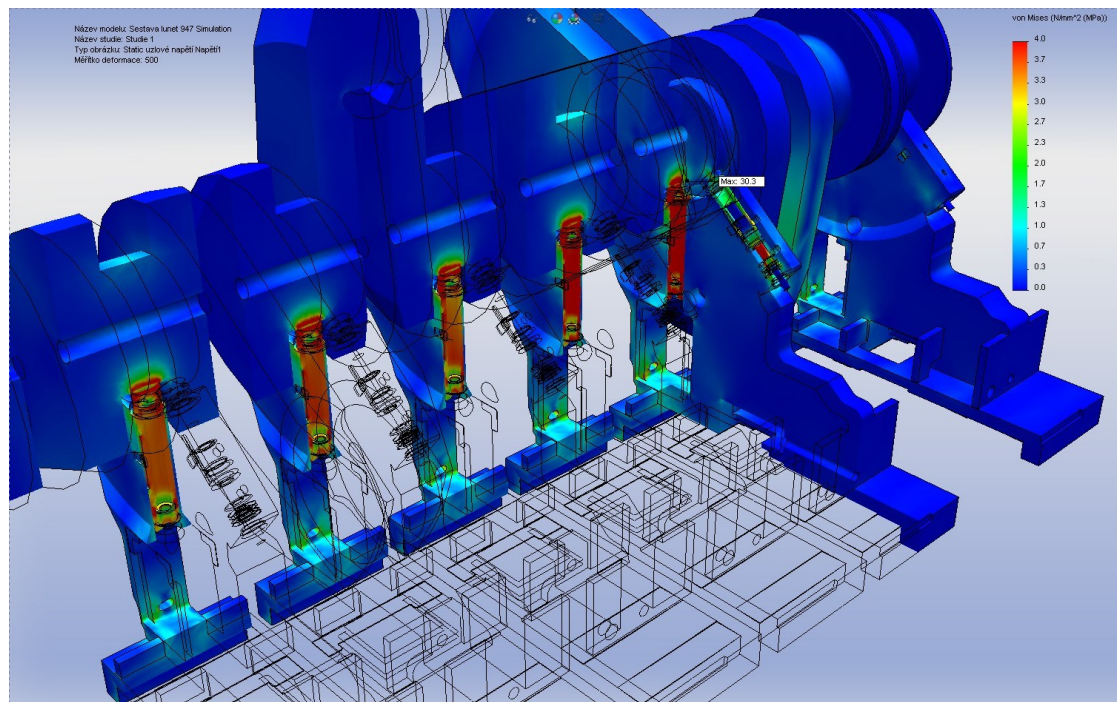


Obr. 6.7 - Piston boční



### Simulace napětí

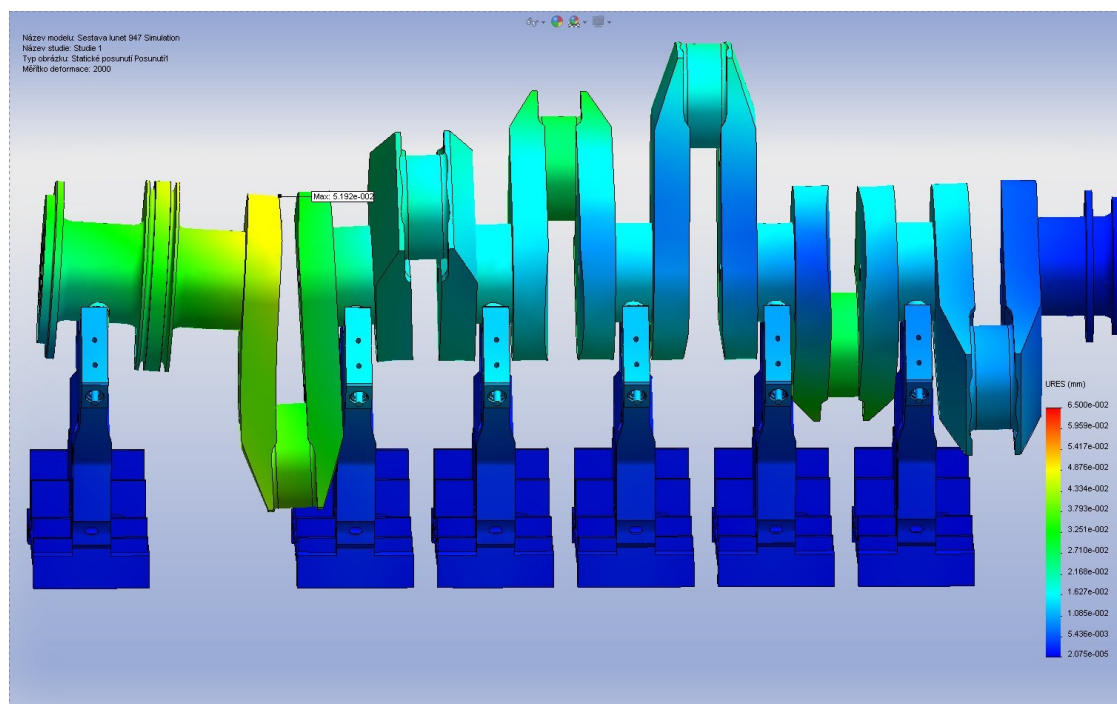
Matematický model klikového hřídele a data použitá při zpracování návrhu lunet umožnil vytvořit simulaci napětí při různých úhlech natočení viz. obr. 6.8.



Obr. 6.8 - Simulace napětí při úhlu natočení 180 st.

### Simulace posunutí

Matematický model klikového hřídele a data použitá při zpracování návrhu lunet umožnil vytvořit simulaci posuvu při různých úhlech natočení viz. obr. 6.9.



Obr. 6.9 - Simulace posunutí při úhlu natočení 180 st.

**Dílčí závěr**

Výše jsou uvedeny jen některé vybrané výstupy z návrhu a analýzy konkrétní podpěrné lunety. Ta by měla splňovat jak požadavky na funkčnost lunety, tak také na snadnou ovladatelnost.

Při samotném návrhu byly provedeny také další analýzy, včetně analýzy dýchání celé sestavy, tedy klikové hřídele podepřené lunetami.

Maximální redukované napětí dle hypotézy von Mises u celé sestavy je 22,89 MPa. Toto je špičkové napětí v oblasti dotyku zalomené hřídele s pistonem. Toto napětí je ovlivněno hustotou vytvořené sítě konečných prvků. Při hustší síti vychází napětí vyšší! Objem elementu, u kterého vychází toto napětí je 0,01% celkové sestavy. Minimální mez kluzu celé sestavy je 82,72 MPa (materiál bronz ČSN 42 37 53), celkový koeficient bezpečnosti je 3,61. Maximální posunutí vůči původnímu tvaru je 0,04 mm a nachází se na krajní hraně listu zalomené hřídele. V této studii vypočtená napětí a posunutí jsou pro polohu hřídele 0° (první zdvih hřídele směřuje nahoru).

Výpočet byl proveden také pro jiné polohy zalomené hřídele a to po 10°. U těchto studií bylo použito v kontaktech součástí zjemnění sítě. Maximální napětí bylo vypočteno na 31,4 MPa, maximální posun 0,064 mm. Pro názornost posunutí hřídele bylo skutečné posunutí 2000x znásobeno.

## **7 Vývoj prototypu lunety, systému řízení, oživení, testování, uvedení do provozu - praktická, dílenská část**

### **7.1 Vývoj prototypu**

Předmětem etapy je kompletní stavba prototypového zařízení aktivně řízených lunet.

Prototypový automatický systém aktivního řízení lunet byl nainstalován na stávající výrobní technologii v NS 370/VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY, kterou příjemce disponuje.

Po výběru vhodné technologie byla v rámci etapy provedena příprava technologie, kontrola konstrukčního řešení a provozních parametrů vybrané technologie, provedeny doplňující konstrukční práce a výpočty, kontrola funkčnosti jednotlivých komponentů výrobní technologie a další podpůrné práce za účelem kompletace a zprovoznění prototypu na výrobní technologii.

Cílem této etapy je testování funkčnosti systému za účelem indikace chyb v softwarové i hardwarové části prototypu a návrh jejich odstranění.

Zaměření prací bylo na oživení všech plánovaných funkcionalit systému, které po instalaci systému na obráběcím stroji může systém vykazovat.

V průběhu etapy bylo provedeno testování provozních režimů a zátěžové testy prototypu pro zjištění funkčních možností, limitů a omezení a především systémových vad a chybných funkcí, které nebyly odstraněny při testování modelu KHLS. Byly vyhodnoceny funkčních vlastností a navrženy úpravy prototypu.

Budou vyhodnocována data:

- naměřených hodnot dýchání listů hřídelí a ověření správnosti jejich bezdrátového přenosu a zpracování systémem; data budou archivována pro podrobnou následnou analýzu
- porovnávání data obrobků – požadovaných hodnot se skutečně naměřenými rozměry po opracování
- vyhodnocení vlivů na provoz obráběcího stroje
- testování funkčnosti systému bezdrátového měření dýchání klikové hřídele
- testování datových přenosů elektrické zařízení
- testování ručních posuvů z ovládacího počítače z dotykového panelu
- testování automaticky generovaných skoků z ovládacího počítače
- testování komunikace proměnné pro komunikaci mezi systémem REX a Simatic pro řízení lunet

Všechna data budou využita pro nápravu zjištěných chybových stavů.

Etapa byla zakončena fyzickou instalací prototypu ověřeného řídicího systému na simulátoru KHLS na reálnou technologii obrábění pro další praktické testování.

### **7.2 Testování a návrh změn řídicího systému**

#### **Testování funkčnosti systému bezdrátového měření dýchání klikové hřídele**

Ověření funkčnosti systému bezdrátového měření dýchání klikové hřídele během otáčení bylo nezbytným předpokladem k dalšímu vývoji HW + SW .

**Cíle měření:**

- Ověření funkčnosti systému bezdrátového měření dýchání klikové hřídele během otáčení.
- Ověření použitelnosti navržených magnetických držáků pro upínání mikrometrů pro měření dýchání.

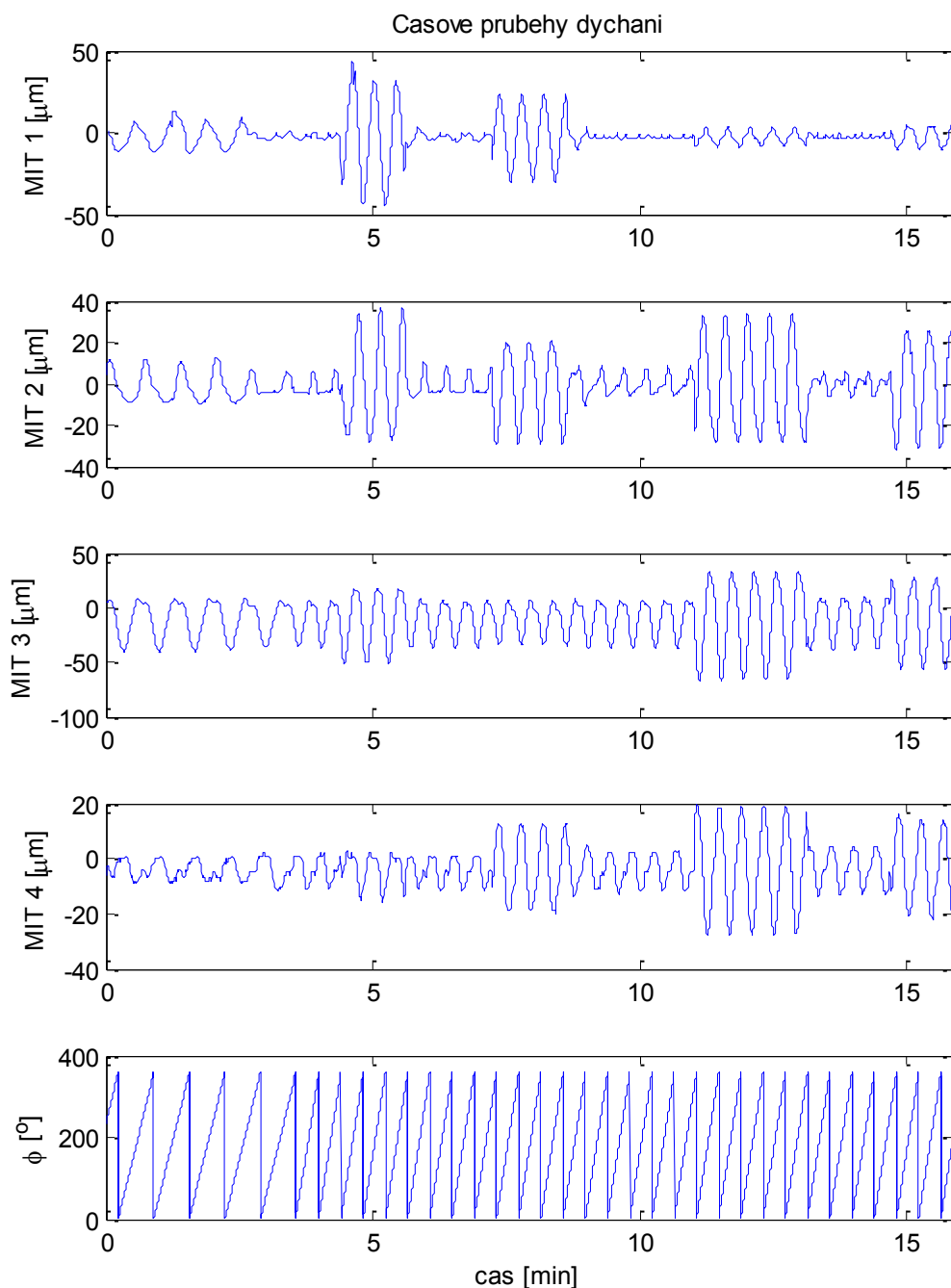


Obr. 7.1 Pohled na přední stranu obráběcího stroje

Po bezproblémovém osazení hřídele bezdrátovým měřicím systémem byla zkontrolována funkčnost jednotlivých čidel a následně bylo zahájeno vlastní měření. Cílem bylo zejména naměřit chování klikové hřídele jako celku během otáčení a během obrábění, zejména vstupně výstupní vazby mezi polohováním pístů jednotlivých lunet a dýcháním mezi čely klikové hřídele.

**Naměřená data:**

Byly naměřeny časové průběhy dýchání na jednotlivých lunetách během otáčení klikové hřídele. Během měření bylo provedeno množství experimentů, z nichž patrně nejpřínosnější, zejména z hlediska pozorování vztahů mezi polohováním pístů a dýcháním hřídele, byly experimenty, kdy bylo naměřeno dýchání v průběhu několika otáček hřídele a poté byla změněna poloha jednoho pístu a opět bylo zaznamenáno dýchání během několika otáček. Průběh takových experimentů je zachycen v grafech na obr. 7.2 .

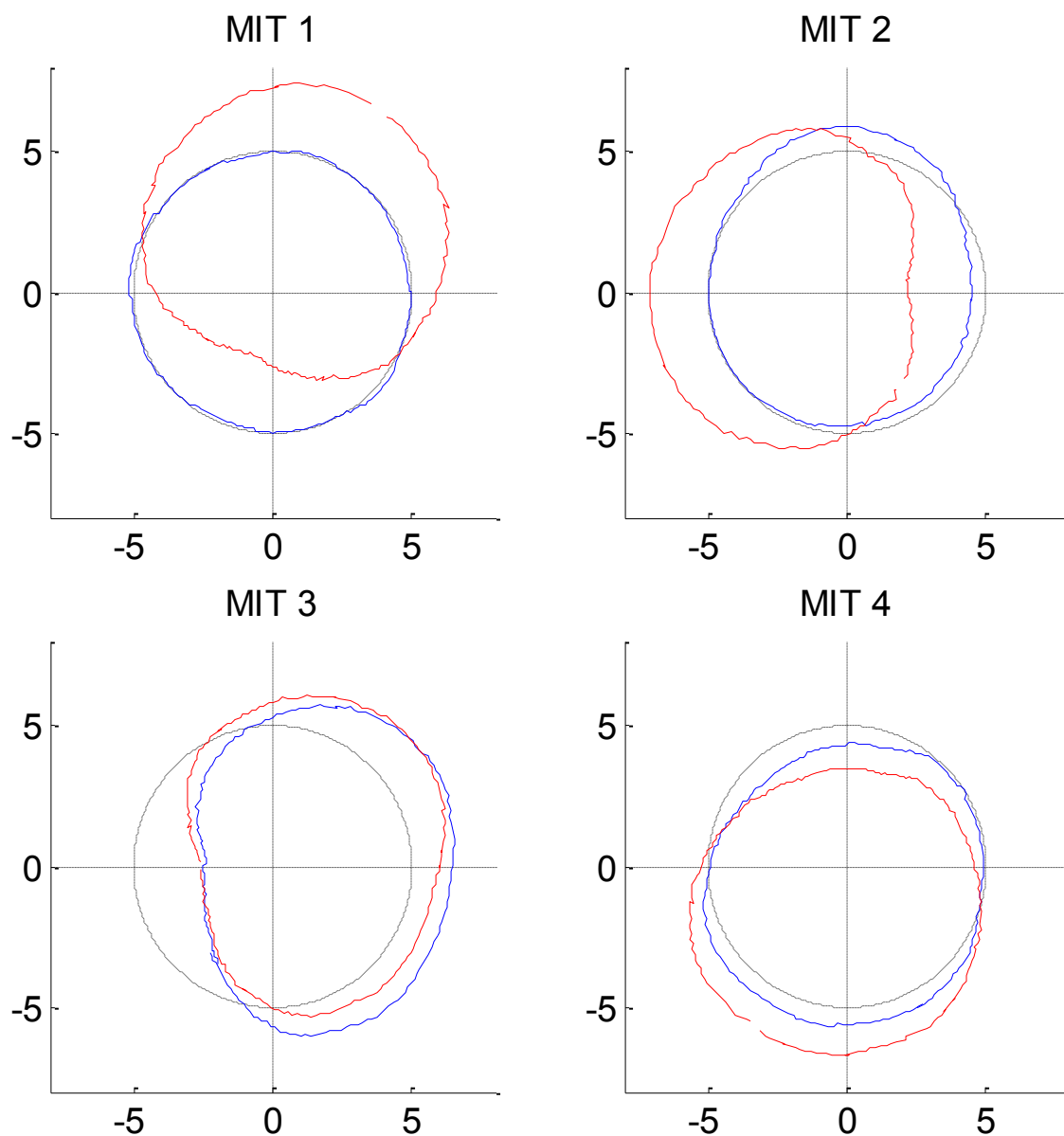


Obr. 7.2 Časové průběhy dýchání při experimentálním zjišťování vztahů

MT1 – MT4 vyznačují měřená místa,  $\phi$  označuje úhel natočení hřídele  
 Zobrazená data jsou pouze zlomkem dat, která byla v průběhu měření získána. Pro ilustraci plně postačují. Z diskuze nad naměřenými daty vyplynula nutnost názornějšího grafického zobrazení naměřených dat. Z důvodu, že časové průběhy nejsou pro vyvažování ani klíčové, ani názorné. Byl vytvořen program pro vizualizaci naměřených dat, který superponuje naměřené dýchání během jedné otáčky na ideální kruh tak, aby bylo ihned patrné, při jakém



natočení hřídele dochází k rozevírání či přibližování jednotlivých čel hřídele. Data jsou zobrazována při pohledu na hřídel jako na obr. 7.2. Při takto zobrazených datech lze již bez problémů určit, jak je potřeba přestavit jednotlivé lunety.



Obr 7.3 Kruhové zobrazení naměřených dat, superpozice na ideální kruh [24]

Hodnoty jsou uváděny v mikronech, MT1 – MT4 vyznačují měřená místa.

Vidíme, že před zásahem (červená čára) se hřídel na první lunetě (tzn. MIT 1) rozevírá zhruba od  $-75^\circ$  do  $110^\circ$  ( $0^\circ$  je v horní poloze), při jiných úhlech natočení se svírá. Obdobně můžeme odečíst deformace na lunetách 2- 4. Na základě těchto dat a zkušeností s vyvažováním hřídelí byl povolen přední piston na lunetě č.1 a výsledkem je dýchání, které je znázorněno modrými čarami.

### Dílčí závěr

Nasazení měřicího systému proběhlo bez potíží, systém pracuje spolehlivě i v náročném průmyslovém prostředí. Oproti prvnímu testu měření byla výrazně zvýšena spolehlivost

přenosu dat v bezdrátové ZigBee síti, při přenosu dat do řídicího systému nastává zanedbatelné množství chyb (cca 0,1 %).

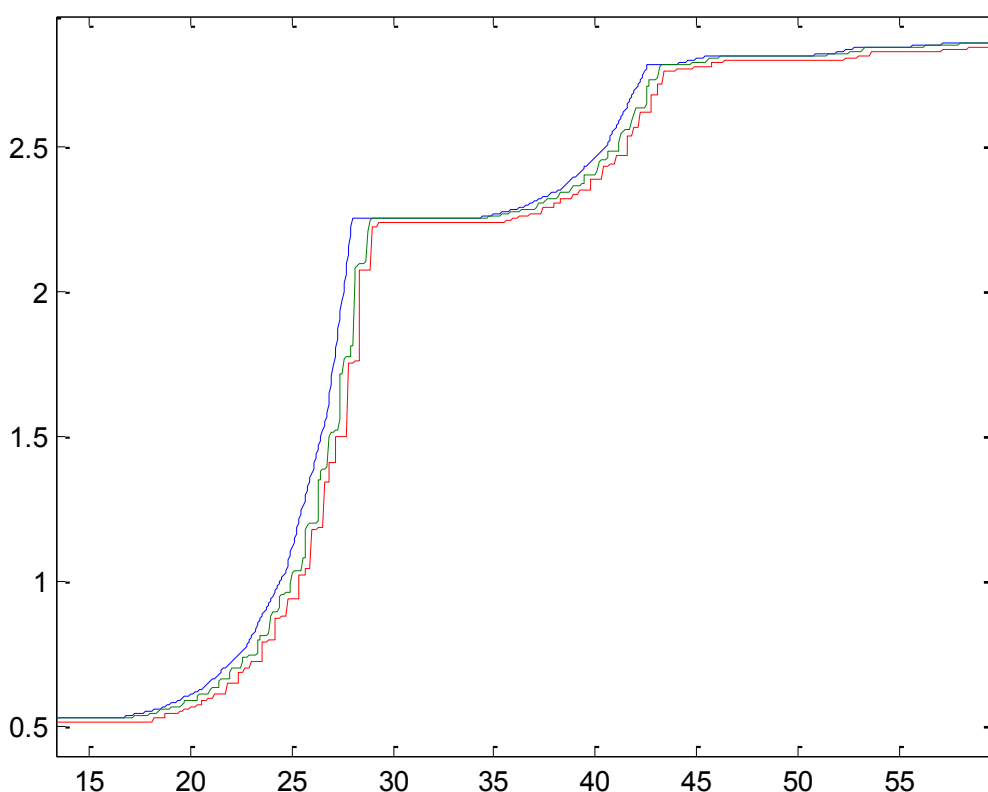
Po vytvoření programu na kruhové zobrazení naměřených dat byl tento systém shledán použitelným a přínosným. Tento způsob prezentace dat bude nadále rozvíjen a stane se i základem pro algoritmus automatického vyvažování klikových hřídelí.

### **Testování datových přenosů elektrické zařízení**

Elektrické zařízení systému aktivně řízených lunet tvoří několik úrovní řízení, mezi které patří SINUMERIK 840D – část NC, SINUMERIC 840D – část PLC, Simatic S7/300, digitální měniče servomotorů (18x), digitální snímače polohy pístů (18x) dotykový display ovládacího panelu a mikrometry Mitutoyo (9x). Mezi všemi uvedenými komponenty probíhá datový přenos prostřednictvím sítě Ethernet. Protože se jedná o nezvyklý počet komponentů řídicího systému, bylo nezbytné prověřit jeho funkčnost a vliv jednotlivých komponentů na spolehlivost a rychlost datového přenosu, dosažení potřebné dynamiky a přesnosti polohování jednotlivých pístů. Mezi uvedené komponenty patří i bezdrátová komunikace (9x) přenosu naměřených dat z mikrometrů Mitutoyo umístěných na klikové hřídeli.

### **Testování ručních posuvů z ovládacího počítače z dotykového panelu**

Na obr. 7.4 je znázorněn několikrát opakovaný ruční posuv pístu směrem vzhůru, nastavovaný z dotykového displeje ovládacího panelu. Dobře je patrné zrychlování požadované polohy pístu (modrá čára) při dlouhém stisknutí tlačítka pro posun nahoru. Vlivem zpoždění datových přenosů je poloha pístu ze Simatic S7 (zeleně) zpožděna a skutečná poloha změřená mikrometrem je zpožděna ještě více, viz dále.



Osa x je kalibrovaná v sec.

Osa Y je kalibrovaná v mm

Barevné označení průběhů :

- **Modrá** – požadovaná poloha posílaná po komunikaci TCP/IP do Simatic S7/300
- **Zelená** – skutečná hodnota přijímaná z komunikace TCP/IP ze Simatic S7/300
- **Červená** – změřená hodnota polohy pomocí mikrometru Mitutoyo

Obr 7.4 Ruční posuvy pistonu nahoru s lunetou č. 1 A [35]

Na obr. 7.4 jsou uvedeny detaily náběhů signálů (vždy z ustáleného stavu). Je vidět, že poloha ze Simatic S7/300 se začne měnit za cca 0,5 s po zaslání požadavku z řídicího počítače. Skutečná poloha měřená mikrometry Mitutoyo je zpožděna o dalších 0,5 s (v tomto čase je obsaženo i zpoždění bezdrátové komunikace, které je min. 120 ms). V grafech není uvedeno zpoždění od zadání povelu z displeje po vyslání povelu do PLC Simatic. Toto zpoždění může být max. 60 ms.

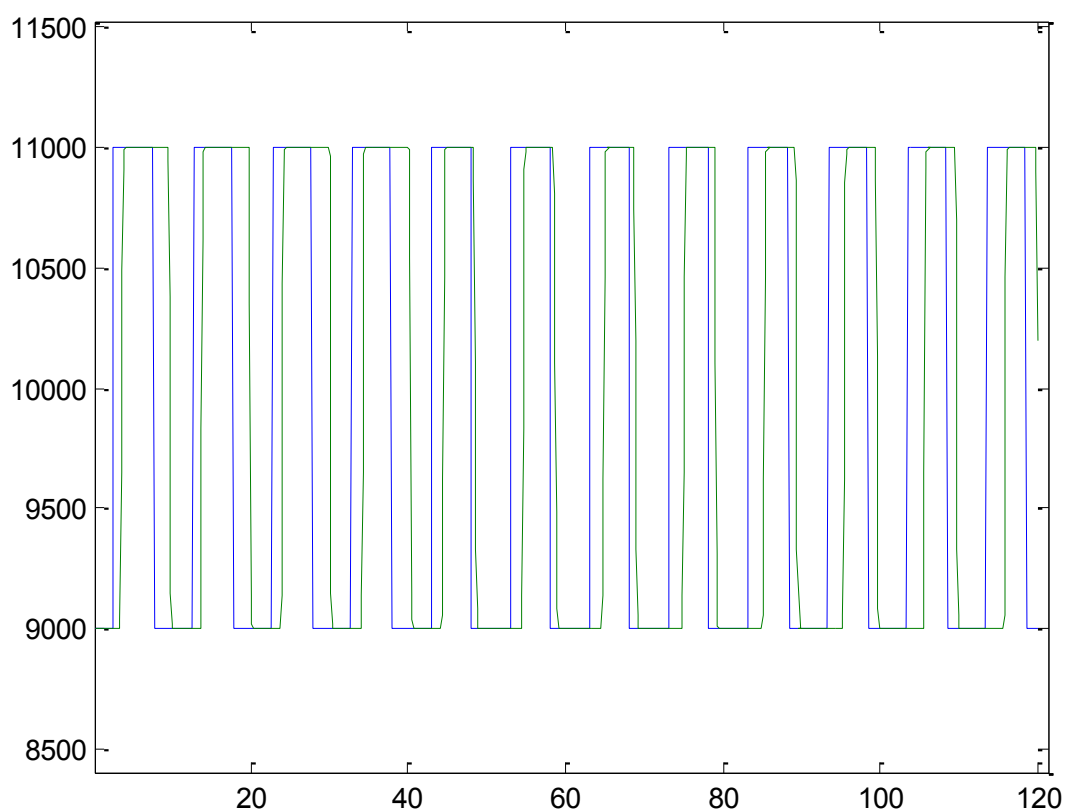


**Testování automaticky generovaných skoků z ovládacího počítače**

V tomto případě byla automaticky generována poloha pro lunetu č. 1., pistonu B. Jsou zde uváděny pouze průběhy požadované hodnoty a hodnoty čtené z PLC Simatic S7.

Z obr. 7.5 je patrný časový posun mezi požadovanou a skutečnou hodnotou polohy. V případě posunu pistonů směrem vzhůru je zpoždění cca 1s, v případě posunu směrem dolů je zpoždění cca 2s.

Poznamenejme, že pistony nebyly zatíženy hřídelí.



Obr 7.5 Generování skoků při nárůstu polohy o 2 000  $\mu\text{m}$  [35]

Osa x je kalibrovaná v sec.

Osa Y je kalibrovaná v  $\mu\text{m}$

### 7.3 Testování komunikace proměnné pro komunikaci mezi systémem REX a Simatic pro řízení lunet

Komunikace na Siemens Simatic používá bloky AG\_SEND a AG\_RECV (vyzkoušeno se Simatic S7-300 a funguje). Zvolený komunikační protokol bude TCP/IP a systém Simatic bude pasivní (slave, server), tj. systém REX bude navazovat spojení.

**Tabulka 7.1 - Testování komunikace REX -> Simatic [36]**

Signál	Typ	Zdroj	Jednotky	Poznámka
L1A_sp	REAL32	REX	[μ m]	Požadovaná hodnota polohy předního pohonu lunety 1
L1B_sp	REAL32	REX	[μ m]	Požadovaná hodnota polohy zadního pohonu lunety 1
L2A_sp	REAL32	REX	[μ m]	Požadovaná hodnota polohy předního pohonu lunety 2
L2B_sp	REAL32	REX	[μ m]	Požadovaná hodnota polohy zadního pohonu lunety 2
...	...	...	...	...
L8A_sp	REAL32	REX	[μ m]	Požadovaná hodnota polohy předního pohonu lunety 8
L8B_sp	REAL32	REX	[μ m]	Požadovaná hodnota polohy zadního pohonu lunety 8
Ctrl1	UINT16	REX	---	Řídicí registr lunety 1
Ctrl2	UINT16	REX	---	Řídicí registr lunety 2
...	...	...	...	...
Ctrl8	UINT16	REX	---	Řídicí registr lunety 8

**Tabulka 7.2 - Bity řídicího registru od nejnižšího (Bit 0) po nejvyšší (Bit 15) [36]**

Bit	Signál	Poznámka
0	EnableA	Povolení měniče prvního pohonu dané lunety (momentálně nepoužito – pohon je aktivní po zapnutí stroje; pohyb se aktivuje náběžnou hranou signálu ExecuteA)
1	HomingA	Povel na najetí první lunety do krajní polohy
2	ContactA	Povel k vyjetí první lunety k dosažení kontaktu s hřídelí
3	ExecuteA	Povel pro start pohybu prvního pohonu lunety (po nastavení požadované hodnoty)
4,..., 5		Rezerva
6	Up3	Vysouvání spodního (hydraulického) pístu nahoru
7	Down3	Zasouvání spodního (hydraulického) pístu dolů
8	EnableB	Povolení měniče druhého pohonu dané lunety
9	HomingB	Povel na najetí druhé lunety do krajní polohy
10	ContactB	Povel k vyjetí druhé lunety k dosažení kontaktu s hřídelí
11	ExecuteB	Povel pro start pohybu druhého pohonu lunety (po nastavení požadované hodnoty)
12,...,15		Rezerva

### Dílčí závěr

Byly provedeny desítky měření pro ověření spolehlivosti datových přenosů, dynamiky polohování pístů a přesnosti polohování.

Z uvedených měření vyplývá, že řídicí systém velmi dobře reprodukuje zadané hodnoty výše zdvihů jednotlivých pístů (obr. 7.2-7.5).

Z uvedených měření též vyplývá, že řídicí systém reprodukuje zadané hodnoty výše zdvihů jednotlivých pístů se zpožděním cca 2 sekundy (obr. 7.5). Toto negativní zjištění bylo kompensováno částečně změnou SW a částečně úpravou zapojení snímače polohy natočení vřetene soustruhu. Obě úpravy vedly ke snížení odezvy na jednotkový skok cca 300 ms, což je hodnota technologicky přijatelná.

Byla též provedena úprava (rozšíření) seznamu proměnných pro komunikaci mezi systémem REX a Simatic.

- přidán signál pro čtení enkodéru ze SIMATICu
- zmenšen počet lunet z 10 na 8
- odstraněn signál pro čtení enkodéru
- přidány příznaky Execute do řídicích registrů
- přidány příznaky Done a Busy do stavových registrů lunet
- přidán příznak Local Control do stavového registru (za celou lunetu)
- doplněny signály pro hydraulický píst (využity rezervní bity ve stavovém a řídicím slově)
- doplněny změny podle zjištěného stavu

Po uvedených úpravách celý systém přenosu dat funguje bez problémů a je připraven k technologickým zkouškám.

Elektrické zařízení systému aktivně řízených lunet bylo navrženo na základě matematického modelu. Tento princip návrhu byl uplatněn jak u části mechaniky, tak u části elektrického zařízení. Ještě před uvedením zařízení do provozu je nezbytné zařízení oživit, resp. kalibrovat. Tento přístup je nezbytný z důvodu optimálního nastavení pro dosažení potřebné dynamiky pohonů a přesnosti při obrábění, resp. odhalení chyb vzniklých při návrhu.

### 7.4 Testování, ověření funkčnosti prototypu řídicího systému řízení lunet

Ve dnech 28.5.-21.6.2012 proběhla ve výrobním závodě Vítkovice- MECHANIKA a.s. funkční zkouška prototypu automatického systému pro ustavování klikových hřídelí.

Během obrábění klikové hřídele typu S50MC bylo ověřeno, že systém nejen splňuje, ale výraznou měrou překračuje požadavky na přesnost ustavení klikové hřídele pro obrábění. Systém pro automatické vyvažování byl vytvořen jako podpůrný nástroj pro obsluhu obráběcího stroje, jehož přínosem je zrychlení a zkvalitnění obráběcího procesu během výroby klikových hřídelí pro pístové motory určené zejména pro lodní průmysl.

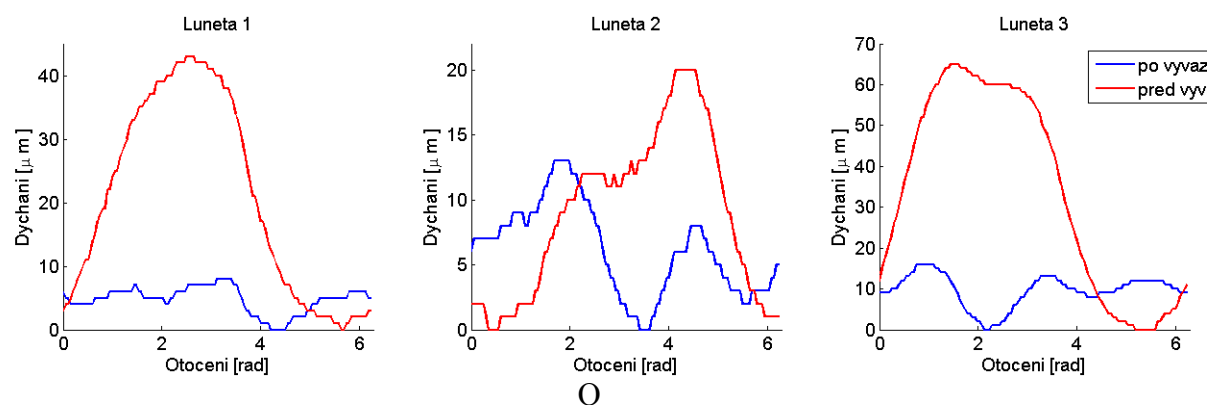
Během obrábění je potřeba opakovaně eliminovat tzv. dýchání hřídele, které se projevuje při jejím otáčení. Díky pružnosti hřídele, její hmotnosti a nepřesnému uložení dochází během otáčivého pohybu při obrábění k deformacím hřídele, které se projevují zmíněným dýcháním. Je-li hřídel řádně ustavena, deformace jsou minimalizovány a dýchání nenastává. Systém pro automatické vyvažování sbírá během otáčení hřídele pomocí sítě bezdrátových měřidel informace o deformacích hřídele, na základě kterých jsou následně upraveny polohy pístů jednotlivých lunet. Systém bezdrátového měření, algoritmus pro určení vhodné pozice pístů i grafické uživatelské rozhraní jsou napojeny na řídicí systém stroje, se kterým tvoří kompaktní celek, jehož ověření bylo předmětem funkčních zkoušek.

## Testování funkčnosti v postupných krocích

### 3.lunety

Během funkčních zkoušek byla kompletně obrobena kliková hřídel typu S50MC. V průběhu obrábění byly přirozeným způsobem vyzkoušeny různé varianty ustavování, kdy obsluha stroje volí na operátorské obrazovce, které zdvihy hřídele je potřeba ustavit a které lunety se k tomu mají využít. Takto je možné vyvažovat hřídel „krok za krokem“ a postupně ji obrábět, což je technika, která byla dosud obsluhou využívána při manuálním ustavování hřídelí a která je tedy pro obsluhu přirozená. Řádově je však zkrácena doba, která je potřebná pro ustavení hřídele. Detailní popis identifikačních experimentů a algoritmu pro automatické ustavování je uveden v [1].

Například při automatickém ustavení prvních 3 zdvihů hřídele pomocí prvních 3 lunet (ve směru od vřeteníku soustruhu) bylo dosaženo následujících výsledků:



Obr. 7.6 – Ustavování klikové hřídele, minimalizace dýchání na jednotlivých lunetách [32]

Z jednotlivých grafů je vidět markantní snížení deformací hřídele, zejména na lunetách č. 1 a č.3. Aby však bylo možné dosáhnout těchto výsledků, je potřeba splnit následující předpoklady:

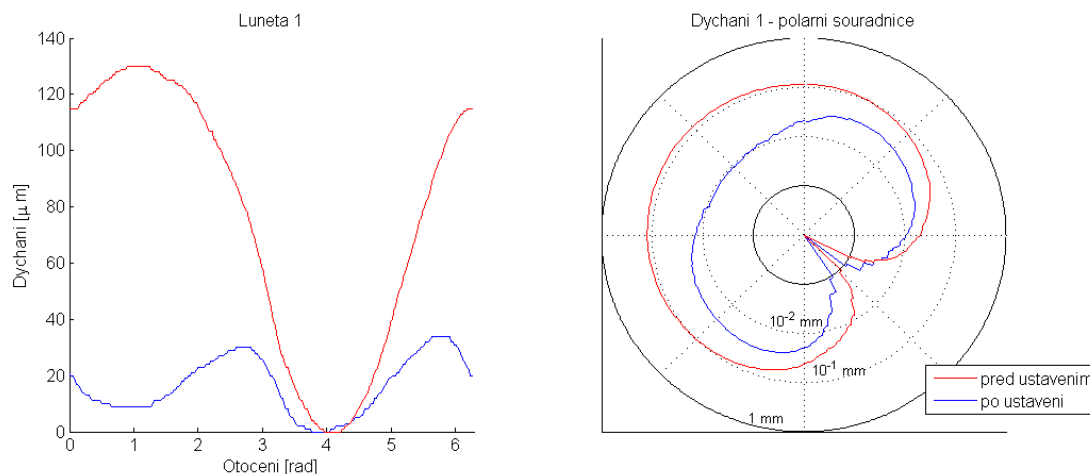
- Pistony všech lunet, které se mají použít pro ustavení hřídele, musí být v průběhu celého vyvažovacího experimentu v kontaktu s příslušným čepem hřídele.
- Testovací posun pístů, který se používá pro zjištění vlivu jednotlivých pístů na deformaci hřídele [1], musí být dostatečně velký, aby byl vliv pístů změřitelný, ale nesmí být příliš velký, aby nedošlo k přílišným deformacím hřídele nebo ke ztrátě kontaktu některého z pístů s hřídelí. Jako vhodné se ukázaly hodnoty 30-400  $\mu\text{m}$ .

Zodpovědným úkolem obsluhy je kontrola vypočteného optimálního vysunutí jednotlivých pístů, které je vypsáno po skončení ustavovacího procesu. Teprve po potvrzení validity vypočtených posunů jsou pistony fyzicky přestaveny do nových pozic. Ustavovací algoritmus je navržen tak, aby byly minimalizovány případy, kdy jsou vypočtena neplatná vysunutí pístů, nicméně zcela vyloučit toto nelze a tak je vždy konečné rozhodnutí ponecháno na úvaze a odpovědnosti obsluhy stroje. Neplatné výsledky ustavovací procedury jsou většinou snadno rozeznatelné, na rozdíl od platných výsledků v řádech jednotek či desítek mikrometrů vycházejí v jednotkách milimetrů.

Na následujících grafech jsou ilustrovány výsledky, kterých bylo dosaženo v různých

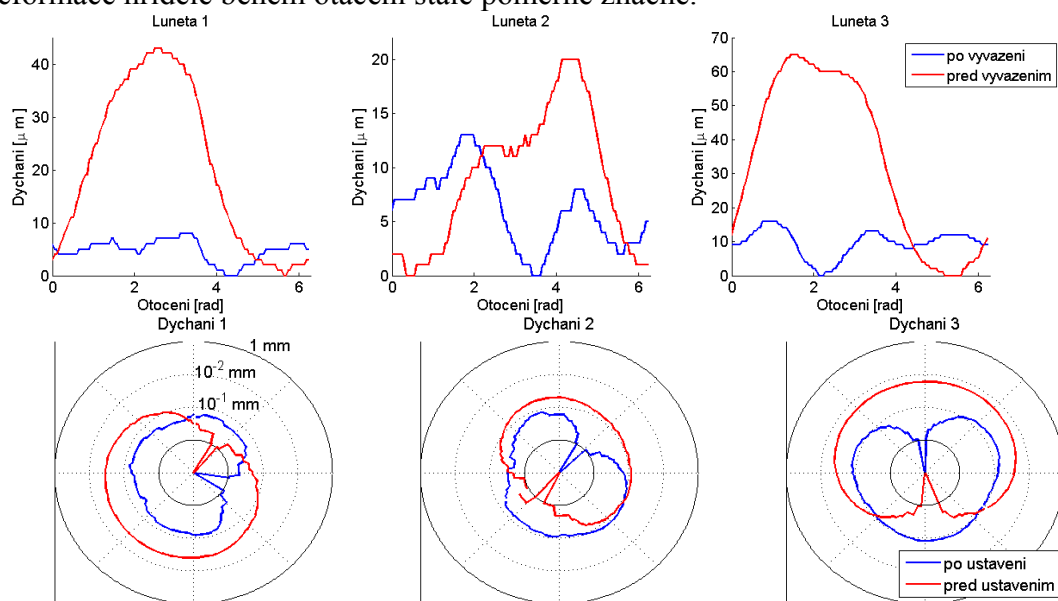
stádiích procesu obrábění klikové hřídele.

Nejprve byla vyzkoušena minimalizace deformací prvního zdvihu hřídele pomocí první lunety.



Obr. 7.7 – Ukázka vyvažování prvního zdvihu hřídele pomocí jediné lunety [32]

Další ukázkou je minimalizace deformací na prvních 3 zdvizích hřídele pomocí prvních 3 lunet. Grafy na obrázku č. 7.8 byly zaznamenány rovněž v brzké fázi obrábění hřídele, proto jsou deformace hřídele během otáčení stále poměrně značné.

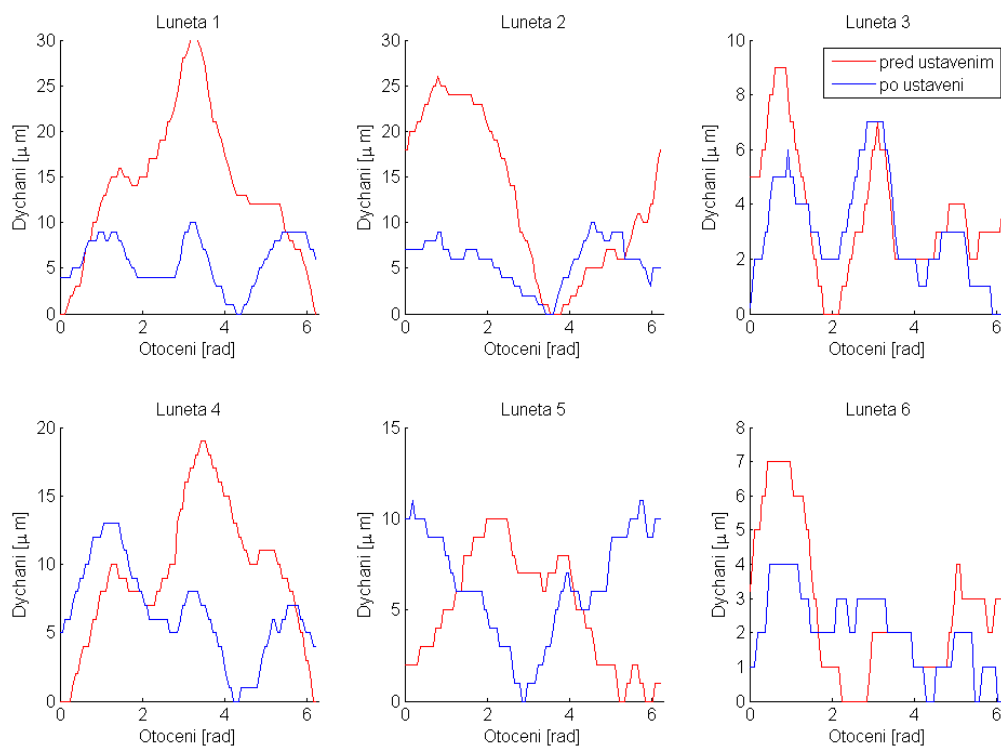


Obr. 7.8 – Vyvažování 3 zdvihů hřídele pomocí 3 lunet [32]

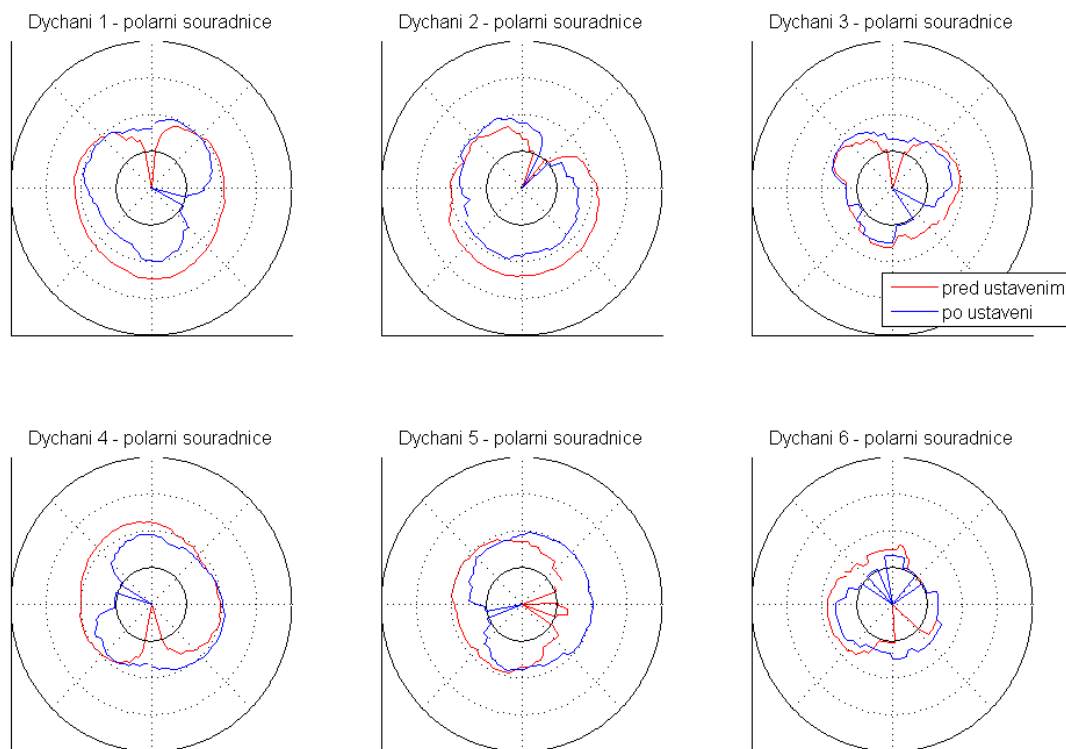
## Testování funkčnosti v postupných krocích

### 6.lunet

Vyvažování celé hřídele pomocí 6 lunet je zachyceno na obrázcích č. 7.8 a 7.9, kde je již téměř dosaženo požadované kvality hřídele – maximální deformace nesmí překročit  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Testovací posun pístů při tomto experimentu byl  $200\text{ }\mu\text{m}$ .



Obr.7.9 – Vyvažování celé hřídele pomocí 6 lunet [32]



Obr. 7.10 - Vyvažování celé hřídele 6 lunetami (v polárních souřadnicích) [32]

Po obrobení čepů hřídele byl experiment zopakován, nyní však s menším testovacím posunem 70  $\mu\text{m}$ . Došlo k dalšímu snížení deformací hřídele, viz obrázky č. 7.9 a 7.10, kterým bylo s velkou rezervou dosaženo požadované přesnosti hřídele. Některé zdvihy, zejména 2, 3 a 5, vykazují skutečně minimální deformace na samé hranici rozlišení digitálních mikrometrů.

## 8 Patenty a užité vzory

- [I] Způsob řízení oscilačníj lunet
- [II] Technologický uzel pro finální opracování klikové hřídele s oscilačními lunetami
- [III] Aktivně řízená oscilační luneta
- [IV] Oscilační luneta se synchronními motory
- [V] PV 1982-3498 231318 B 30 B 15/00  
Zapojení pro automatické vyrovnání deformace rámu lisu
- [VI] PV 1982-4541 225384 B30B015/00  
Zapojení regulačních obvodů vyboulovacího lisu

## 9 Závěr

Cílem disertační práce na téma „Návrh systému řízení lunet pro vyrovnávání pružné deformace zalomeného hřídele při obrábění“ je dosažení automatického vyvažování klikových hřídelí během procesu ustavení i během obráběcího procesu. Nezbytným předpokladem pro dosažení tohoto úkolu bylo detailní seznámení se současnou technologií obrábění a to především formou rozsáhlých měření. Získaná data pak byla srovnávacím podkladem pro nově navržené technické prostředky řízení. Jde především o způsob měření „dýchání“ čel listů klikové hřídele během otáčení a bezdrátový přenos dat. Konečným řešením pak byl návrh vlastního řídicího systému. Neocenitelným přínosem pro uvedený návrh byla matematická simulace celého procesu ustavení i obrábění, který včas odhalil některé nedostatky počátečního návrhu. Řešení dosud nebylo aplikováno v průmyslové praxi, s přímým dopadem na kvalitu prováděných operací i celkovou produktivitu práce.

### 9.1 Přínosy pro uživatele

#### Eliminace rizik spojených s lidským faktorem

Do současné doby byly zkušenosti pracovníků obsluhy obráběcích center nenahraditelným aktivem. Obsluha při obrábění klikových hřídelí postupuje zčásti intuitivně, protože každá kliková hřídel při opracování vykazuje jiné chování.

Aktivní využití automatizace vyvažování hřídele při obrábění umožní zaměstnat i méně zkušené pracovníky a snižuje rizika vyplývající z neznalosti věci.

Dosažené geometrické parametry hlavních čepů po opracování v automatickém režimu posunuly přesnost opracování(házivost,válcovitost,dýchání) do přesnosti 0,005mm.

Automatizace vyvažování klikových hřídelí při výrobě je *optimálním řešením*, jak dosáhnout na kvalitativně vyšší úroveň řízení obráběcího procesu při zvýšení kvality i produktivity práce.

#### Úspora nákladů

Klikové hřídele jsou velmi drahé komponenty. Cena je dána jejich velikostí i náročností na technologický proces a instalované technologie. Instalace navrhovaného systému odstraní v naprosté většině vznikající nekvalitní výrobu ve výrobě a významně snižuje materiálovou spotřebu.

Na testované ZH-6S 50MCC došlo během druhého testů k úsporám 81 hodin,při průměrné sazbě 2000,-Kč/OH úspora činí 162 000,-Kč.

Ve zkušebním provozu jsme dosáhli ke snížení potřebného technologického času na opracování .průměrně o 28% - viz tabulka 9.1.



Tabulka – Tabulka výrobních časů jednotlivých typů ZH ve zkušebním provozu

Typy ZH	Původní čas opracování	Čas opracování s vyvažováním	$\Delta$ [%]
6S 42	298	228	24
6S 46	320	230	28
7S 35	278	216	22
6RT 48T-B	366	252	31
6RTA 52	285	199	30
6S 50MCC	269	188	31
7S 50MCC	285	195	32

### Ekonomické přínosy řešení

Řešení přináší efekty pro majitele vzniklého know-how nejen z úspory OH a z eliminace rizik spojených s lidským faktorem, ale také z výnosů z prodeje know-how .

Očekávané výnosy z prodeje navrhovaného řešení jako konečného produktu jsou mimořádné. Výnosy vycházejí ze střízlivého rozboru založeného na datech z analýzy trhu světových výrobců klikových hřídelí, kterou zpracovává obchodní oddělení VÍTKOVICE MECHANIKA s.r.o. při komunikaci s klienty v oblasti repase obráběcích strojů.

Velikost očekávané poptávky vychází ze zjištěných stavů již instalovaných obráběcích center těchto světových výrobců.

Informace o projektovém záměru je však potřeba tajit před konkurenčními firmami, pro které by tato informace byla jistě impulzem pro nastartování vlastního VaV v této oblasti, což by nás připravilo o konkurenční výhodu i patentová práva.

### 9.2 Předběžný průzkum upotřebitelnosti výsledků řešení na trhu

Projekt zabezpečuje využití tržní mezery ve zvoleném segmentu trhu, kdy dochází ke zvýšené poptávce jak hotových hřídelí, tak i po segmentech hřídelí pro konečnou montáž u výrobců především lodních motorů zvláště v asijské oblasti.

Množství poptávek na zalomené hřídele se mění s životností a technickými podmínkami lodí. Vlivem projektování velkokapacitních lodí se v současné době motory posouvají k vyšším výkonům. Vzhledem k velmi dobrému technologickému strojírenskému know-how se jedná o stabilní obor.

Upotřebitelnost na trhu a velikost trhu opracování byla stanovena na základě zkušenosti s dodávkami pro tuto oblast. Počet firem zabývajících se výrobou motorů využívající daný typ klikových hřídelí v této oblasti je stabilní z několika důvodů. Mezi nimi jsou nejdůležitější:

- vysoké investiční náklady na vstup do odvětví,
- velmi těžce přístupné (získatelné) know-how nutné pro výrobu, které se navíc váže k dlouholetým zkušenostem jednotlivých pracovníků v dané oblasti opracování klikových hřídelí.

Firmy v dané oblasti jsou známé. Níže je uveden výčet největších firem evropského a asijského trhu.

**Evropa**

- SELZA (Polsko)
- Vítkovice Heavy Machinery (ČR)
- Sidenor (Španělsko)
- Waldrich Coburg (Německo)

**Japonsko**

- Kobe Steel
- Sazeno
- Mitsubishi

**Korea**

- Hyundai
- Doosan Heavy Machinery
- STX

**Čína**

- Wuhan Heavy Machinery (Čína)
- Shanghai Marine Crankshaft Co. (Čína)
- Dalian Huarui Crankshaft Co. (Čína)
- DHI.DCW Group Co. (Čína)
- Qingdao Haixi Heavy Industry Co. (Čína)

Celková kapacita trhu v Evropě a Asii je v současné době odhadována na cca 750 mil. Kč při odhadované ceně kompletní dodávky systému do 20 mil. Kč. Do této hodnoty však není započítána část trhu amerického kontinentu, kde zatím nejsou navázány obchodní kontakty. Uvedená studie trhu tedy vychází z instalovaných kapacit strojů pro tento typ obrábění u známých výrobců v Evropě a Asii.

Mimo výše uvedené tradiční výrobce klikových hřídelí probíhají další investice do lodního průmyslu, zejména v oblasti stavby lodí v Číně. Nové výrobní kapacity například v Guangzhou, které jsou největší výrobní základnou lodních motorů v Číně.

Tento segment trhu představuje minimálně stejnou výši poptávky jako v současné době instalované funkční technologie.

Další část trhu, která není brána v úvahu jsou výrobci obráběcích center na světovém trhu, se kterými bude jednáno o formě využití výsledků projektu.

**9.3 Přínosy pro realizaci v praxi a pro další rozvoj oboru**

Byla s úspěchem ukončena výzkumná a vývojová fáze realizace aktivně řízené oscilační lunety, jejímž jedním z výstupů je prototyp zařízení pracující ve výrobě ZH ve VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. Pro poměrně hladký průběh významně přispěly zpracované matematické modely zalomených hřídelů, simulátor KHLS, které dokázaly avizovat „slepé cesty“ výzkumu a vývoje systému řízení lunet pro vyrovnávání pružné deformace zalomeného hřídele při obrábění. Na základě uvedených výsledků výzkumu a

vývoje je nyní zpracován projekt pro aplikaci na ostatní soustruhy pro možnost opracování ZH v celém typovém sortimentu.

### **Možnosti výzkumu a vývoje do budoucna**

- Bezdrátové napájení bezdrátových snímačů (zdroj napájení pro bezdrátové snímače deformací by se dobíjel otáčivým pohybem hřídele).
- Detekce kontaktu lunety a hřídele (pomocí tlakových nebo tenzometrických snímačů by bylo možné detekovat nežádoucí ztrátu kontaktu podpěrné lunety s hřídelí a zvýšit tak spolehlivost celé metody).
- Častější měření deformací během otáčení (umožnilo by zvýšení rychlosti otáčení hřídele při vyvažovacím experimentu, čímž by se výrazně zkrátila doba potřebná k ustavení hřídele).
- Výzkum a vývoj automatické nastavování obrobků(hřídelí-tzv. „tlusté“ a štíhlé s velkým L/D) během opracování, hřídelí pro energetiku a lodní průmysl

Během funkčních zkoušek byla ověřena funkčnost celého systému pro automatické nastavování klikových hřídelí včetně zaškolení obsluhy stroje. Podařilo se splnit výraznou měrou překonat požadavky na přesnost finálně obrobene hřídele. V současné podobě je však systém plně funkční, dosahuje excelentních výsledků a operátory pracoviště byl velmi kladně přijat.

Ovládání aplikace je podrobně vysvětleno pomocí video - tutoriálu, který je přílohou 11[III] Animace - Sestava lunet FR-TI1-522-947 motion - bez hodinek,[IV] Video - Strih 4 hnízdo oprava\_WMV 480p (16x9),[V] Text - Uživatelská příručka: Systém automatického vyvažování zalomených hřídelí.

## **9 CONCLUSION**

The aim of the doctoral thesis on topic "The draft the management system of lunettes for equalization the elastic deformation a crankshaft during machining" is to achieve automatic balancing of crankshafts during the process of the setting and during the machining process. A prerequisite for achieving this task was detailed introduction to the current machining technologies, primarily this was achieved by extensive measurements. The obtained data was then used as a comparative basis for the proposed new technical means of control. This mainly concerns the measurement method of "the breathing" the headboards of sheets the crankshafts during rotation, and and the wireless transmission of data. The ultimate solution was then the draft the own control system. An invaluable benefit of the said draft was a mathematical simulation of the entire process setting and machining, which revealed some shortcomings of the initial draft. This solution has not yet been applied in a industrial practice, with a direct impact on the quality of operations and overall productivity

### **9.1 The benefits for users**

The risks associated with the human factor elimination.

The machining centers operator's experiences were irreplaceable asset until now.. The

operators during machining of crankshafts progresses intuitively because each crankshaft when it is machined behaves differently.

The active use of automation a crankshaft balance during machining allows to employ a less skilled workers and reduces the risks arising from ignorance of things.

After processing in automatic mode shifted the precision of machining (runout, roundness, "breathing") and the geometric parameters achieved accuracy 0.005 mm.

Automation of the crankshafts balancing during production is the optimal solution how to achieve a qualitatively higher level of control the machining process while increasing quality and productivity.

### **The cost saving**

The crankshafts are very expensive components. Their price varies by their size and complexity of technological process and installed technology. After the installation of the proposed system removes the vast majority of poor quality production in the production and significantly reduces material consumption. On the tested ZH-6S 50MCC during the second test was achieved saving of 81 hours, at an average hourly rate of 2000 CZK. The saving is 162 000 CZK.

In the probationary operation we reduced the required technological time for machining on average about 28% - see the table 9.1.

Table 9.1 - Table of production times of each type of ZH in probationary operation

<b>Type of crankshaft</b>	<b>Original machining time</b>	<b>Machining time with balance</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>
6S 42	298	228	24
6S 46	320	230	28
7S 35	278	216	22
6RT 48T-B	366	252	31
6RTA 52	285	199	30
6S 50MCC	269	188	31
7S 50MCC	285	195	32

### **The economic benefits of the solution**

The solution brings effects for owners of existing know-how not only the savings from the worked hours and from the elimination of risks associated with human factors, but also from the yields of the sale of know-how.

The expected revenues from the sale of the proposed solution as the final product are exceptional. Revenues are based on a sober analysis based on data from market analysis of global crankshafts manufacturers, which handles the sales department of VÍTKOVICE MECHANIKA a.s. which is communicating with clients during the reconditioning of machine tools.

The size of the expected demand is based on the identified statuses, which are already installed in machining centers manufacturers in the world.

Information about the project's intent, is need to keep hold a secret ahead of competing firms, for which will be this information certainly impetus for starting their own R & D in this area, which would have deprived us a competitive advantage and patent rights.

## 9.2 Preliminary exploration of usability the solutions on the market

The project provides to use the gaps on the market in their chosen market segment, when there is an increasing demand both, finished shafts and the segments of shaft for final assembly at the manufacturers mainly marine engines, particularly in the Asian region. The number of demands for crankshafts varies with the technical conditions and of service life the ships. Due to the design of high-capacity ships the motors are currently building with higher performance. Due to the very good mechanical engineering technological know-how is it a stable branch.

Applicability on the market and size of the market in the machining branch was determined on the basis of experience with deliveries in this area. The number of the companies engaged in the production of engines using the type of crankshafts in this area is stable from several reasons. Among them are the most important:

- High investment costs for entry into the industry
  - Very difficult to access know-how needed for production, which in addition is connected to the a long experience of individual workers in the field of the crankshafts machining.
- Firms in this area are known.

Below is a list of the largest companies in the European and Asian market:

### Europe

- Fail (Poland)
- Vitkovice Heavy Machinery (Czech Republic)
- Sidenor (Spain)
- Waldrich Coburg (Germany)

### Japan

- Kobe Steel
- Sazeno
- Mitsubishi

### Korea

- Hyundai
- Doosan Heavy Machinery
- STX

### China

- Wuhan Heavy Machinery (China)
- Shanghai Marine Crankshaft Co. (China)
- Dalian Huarui Crankshaft Co. (China)
- DHI.DCW Group Co. (China)
- Qingdao Haixi Heavy Industry Co. (China)

The total capacity of market in Europe and Asia is currently estimated about 750 mil. CZK when the estimated cost of the complete system of delivery are under 20 mil. CZK. This value, however, does not include the market share of the American continent, where are not

established business contacts yet. The market study is therefore based on the installed capacities of machines for this type of machining with well-known manufacturers in Europe and Asia.

Besides the above mentioned traditional manufacturer of crankshafts are ongoing further investments in the shipbuilding industry, particularly in the field of shipbuilding in China. New production capacities, for example, in Guangzhou, which is the largest production base of marine engines in China.

This segment of the market represents minimally the same level of the demand as a currently installed functional technology.

Another parts of the market, which are not taken into account, are manufacturers of the machining centers on the world market which will be negotiation about use of the project results.

### **9.3 Benefits for the implementation in practice and for further development of the field**

The phase of research and development of implementation actively controlled oscillation steady rest was successfully completed, its one of the outputs is a prototype devices operating in the production of crankshafts in VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. For relatively smooth process significantly contributed processed mathematical models of crankshafts, simulator KHLS which proved notify "impasse" R & D system management of lunettes for balancing the elastic deformation of the crankshaft during machining. On the results of research and development is now prepared a project for exploitation option this application on other lathes for machining the crankshafts throughout the rating range.

#### **The research and development into the future**

- Batteryless power wireless sensors (power for supply a wireless sensors of deformation would be charged by the rotary motion of the shaft).
- Detection of a contact of the supporting steady rest and the shaft (by means of pressure sensors or strain gauges could be detected undesirable loss of a contact of the supporting steady rest with the shaft and thus increase the reliability of the whole method).
- More frequent measuring a deformation during rotation (it would be allow an increase in shaft rotary speed during the experiment of a setup, thereby significantly reduce the time needed to setup the shaft).
- Research and development of automatic positioning workpieces (shafts-so-called „thick“ and slender with large  $L / D$ ) during machining, shafts for energy and marine industry

During the functional tests was checked operation of the entire system for the automatic setup of crank shafts, including training of machine operators. We managed to meet and significantly overcome the accuracy requirements finally machined shaft. In its current form, however, the system is fully functional, achieves excellent results and by operators of workplace was very well received.

Control of a application is explained in detail with a video - tutorial, which is attached to 11 [III] Animation - Set of lunettes FR-TI1-522-947 motion - without a watch, [IV] Video - Cut 4 oprava\_WMV nest 480p (16x9), [V] text - User Guide: The automatic system of balancing a crankshafts.

## 10 Seznam použité literatury

- [1] Dahleh M., Dahleh M.A., Verghese G.: Lectures on Dynamic Systems and Control, MIT, 2011.
- [2] Coleman M.P.: An Introduction to Partial Differential Equations with MATLAB. Chapman & Hall/CRC, 2005
- [3] Dupal J.: Prutový model klikového hřídele. Výzkumná zpráva pro project MPO FR-TI/522, ZČU v Plzni
- [4] SIEMENS, Publics MCD Corporate Publishing 2001
- [5] Siemens SIMODRIVE 611Digital, SINUMERIK 840D/810D, Drive function 10- 2004
- [6] SIEMENS a.s. Návod k programování: Základy. 4. vyd. Erlangen: SIEMENS, 2000. 456 s.
- [7] CNC s řídicím systémem Sinumerik 840D. Výukový text v oboru „Strojírenská technologie – obrábění“ [CD-ROM]. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie
- [8] KURKA, Jiří. Řídicí systémy, pohony a motory pro obráběcí stroje společnosti Siemens.[online].[cit.00-03-08]
- [9] Daněk, O.: Redukce a kondenzace nekonzervativních systémů
- [10] Prof. Ing. Miloš Schlegel CSc, ZU Plzeň, Automatické ustavování klikového hřídele
- [11] Ing. Jana Kovářová, ZU Plzeň, Zkoumání kvazistatických vlastností hřídele
- [12] Doc. Dr. Ing. Jan Dupal, Ing. Jana Kovářová , ZU Plzeň, *Matematické modelování klikového hřídele S50 MC-C*
- [13] doc. Ing. Jiří FRIES, Ph.D., Dr. Ing. Miroslav BOVA, VŠB Ostrava, Pevnostní výpočty a matematické modely strojní technologie a návrh hydraulických podpěrných lunet
- [14] Dupal, J.-Kovářová, J.: Matematické modelování klikového hřídele S50 MC-C. Vz FR-TII\_522\_1. Plzeň 2010

[15] Dupal, J.: Výpočtové metody mechaniky. Skripta ke stejnojmennému předmětu na FAV ZČU v Plzni, Plzeň 1999

[16] Dupal, J.: Dynamická analýza a optimalizace těleso-nosíkových a rotorových soustav. Habilitační práce, ZČU v Plzni, 1999

[17] Ing. Josef Kraus, Prof. Ing. Miloš Schlegel, CSc., Ing. Pavel Balda, Ph.D. - *Hardwarové řešení automatického systému aktivního řízení lunet pro vyvažování klikových hřídelů při obrábění*

[18] doc. Ing. Jiří FRIES, Ph.D., doc. Ing. František HELEBRANT, CSc., prof. Ing. Josef JURMAN, CSc. - *Výzkum a vývoj automatického systému aktivního řízení lunet pro vyvažování klikových hřídelů při obrábění*

[19] Kovářová Jana – Zpráva o průběhu měření 10.-11.5.2010 (interní zpráva)

[20] Georgiev, Vjačeslav; Ježek, Ondřej; Krutina, Aleš; Sobota, Jaroslav; Schlegel, Miloš. *ZigBee-based wireless measurement system*. In Process Control 2010. Brno : Tribun EU, 2010. s. 1-9. ISBN: 978-80-7399-951-3.

[21] DUBINA, S. Modernizace obráběcích strojů. *Technická diagnostika*, 2010, roč. XXIX. s. 64 - 70. ISSN 1210-311X.

[22] DUBINA, S. – FRIES, J. *Modernizace obráběcích strojů*. In 15<sup>th</sup> International Scientific Symposium Quality And Reliability Of Machines. Nitra: SPU Nitra, 2010. s. 238 - 241. ISBN 978-80-552-0390-4.

[23] Georgiev Vjačeslav - Popis obvodů senzorové sítě založené na modulech ZigBee od Digi (interní zpráva)

[24] Sobota Jaroslav – Zpráva o průběhu měření 9.-11.11.2010 (interní zpráva)

[25] Dupal Jan – Prutový model klikového hřídele (výzkumná zpráva), ZČU Plzeň

[26] SCHLEGEL Miloš – Automatické ustavování klikového hřídele-Formulace úlohy a algoritmus řešení (výzkumná zpráva), ZČU Plzeň

[27] FRIES, J. Výzkum a vývoj automatického systému aktivního řízení lunet pro vyvažování klikových hřídelů při obrábění. Zpráva VŠB – TU Ostrava. Ostrava 2011, 21 str. (Uloženo u řešitele a spoluřešitele – VŠB-TUO, místnost A420)

[28] FRIES, J. – DUBINA, S. Časová náročnost obrábění klikových hřídelů. *Technická diagnostika*, 2011, roč. XXX. s. 146 - 151. ISSN 1210-311X.



- [29] FRIES, J. – DUBINA, S. *Sledování obrábění klikových hřídelí*. In 16th International Scientific Symposium Quality And Reliability Of Machines. Nitra: SPU Nitra, 2011. s. 118 - 122. ISBN 978-80-552-0595-3.
- [30] SCHLEGEL, M. - Automatické ustavování klikového hřídele: Formulace úlohy a algoritmus řešení, Výzkumná zpráva, ZČU v Plzni, 2012
- [31] SCHLEGEL, M.; SEVERA, O. - Systém automatického vyvažování zalomených hřídelí: Uživatelská příručka, ZČU v Plzni, 2012
- [32] SCHLEGEL, M.; SOBOTA, J. Systém pro automatické vyvažování klikových hřídelí: funkční zkoušky. Výzkumná zpráva. ZČU v Plzni, 2012.
- [33] DVOŘÁK, M.; KRAUS, J.; DUBINA, S.; SCHLEGEL, M.; FRIES, Automatický systém aktivního řízení lunet pro ustavení klikových hřídelí. MM Průmyslové spektrum, str. 84,10/2012
- [34] SCHLEGEL, M.; KRAUS, J.; DUBINA, S.; BALDA, P.; ŠTĚTINA, M. - Propojení jednotlivých komponent systému a komunikační protokol (interní zpráva), ZČU Plzeň
- [35] Balda P. – Zpráva o průběhu měření 15.3.2012 (interní zpráva)
- [36] Balda P., Štětina P. – Zpráva o průběhu měření 11.9.2011 (interní zpráva)
- [37] Kraus J. – Návrh HW řešení-část soustruh. Výzkumná zpráva, v Plzni, 2009

## 11 Přílohy

- [I] Animace - Napětí sestavy GRANT FR-TI1-522
- [II] Animace - Posunutí sestavy GRANT FR-TI1-522
- [III] Animace - Sestava lunet FR-TI1-522-947 motion - bez hodin
- [IV] Video - Střih 4 hnízdo oprava\_WMV 480p (16x9)
- [V] Text - Uživatelská příručka: Systém automatického vyvažování zalomených hřídelí
- [VI] Text - Analýza napětí sestava lunet 947 Simulation

Autor	Ing. Stanislav Dubina
Katedra, institut	Katedra výrobních strojů a konstruování 340
Název	Návrh konstrukce systému řízení a pohonu lunet pro vyrovnání pružné deformace klikového hřídele při ustavení a obrábění
Místo, rok, vydání	Ostrava, 2014, 1. vydání
Počet stran:	
Vydala:	Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava
Tisk	Katedra výrobních strojů a konstruování 340

Náklad	25 kusů
Neprodejné	

**ISBN 978-80-248-3521-1**